



UNIVERSIDAD DE CUENCA

FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

MAESTRÍA EN CONSTRUCCIONES, TERCERA COHORTE

TÍTULO DEL ARTÍCULO CIENTÍFICO

“ANÁLISIS DEL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA EN LA DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA CONTENIDA Y LAS EMISIONES DE CO₂ EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN PREMEZCLADO; CASO DE ESTUDIO: PLANTA PREMEZCLADORA DE LA CIUDAD DE CUENCA”

ARTÍCULO CIENTÍFICO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE
“MAGISTER EN CONSTRUCCIONES”

AUTOR: ARQ. KARLA GABRIELA VÁZQUEZ CALLE
C.I: 0301852158

DIRECTOR: ARQ. MSc. VANESSA FERNANDA GUILLÉN MENA.
C.I: 0104436357

ECUADOR, CUENCA 2016



Resumen

La industria y el transporte son actividades antropogénicas responsables de un alto dispendio energético a nivel global. La industria de la construcción implica notables impactos ambientales en cuanto al consumo de recursos naturales, energía y emisión de gases de efecto invernadero. En el mundo y en Ecuador, uno de los materiales de construcción más empleado es el hormigón.

En este contexto, en la presente investigación se muestran los resultados de la determinación de la energía contenida y las emisiones de CO₂ asociadas al proceso de fabricación del hormigón, considerando como caso de estudio una planta premezcladora de la ciudad de Cuenca, mediante la aplicación de un Análisis de Ciclo de Vida Simplificado “de la puerta a la puerta”.

Al aplicar el “Inventario de Ciclo de Vida” (ICV) conforme lo establece la Norma ISO 14040:2006, el estudio determinó que para producir 1 m³ de hormigón premezclado se requieren 568,69 MJ, lo que genera emisiones al ambiente de 42,83 kg de CO₂/m³. La actividad a la cual se le atribuye el mayor porcentaje de consumo energético y emisiones de CO₂ corresponde al *transporte indirecto* (traslado de materia prima).

Palabras claves

Análisis de ciclo de vida; inventario; energía contenida; CO₂; hormigón premezclado.

Abstract

Industry and transport are anthropogenic activities responsible for a high energy expenditure at a global level. The construction industry involves significant environmental impacts in terms of consumption of natural resources, energy and greenhouse gas emissions. In the world and in Ecuador, one of the most used building materials is concrete.

In this context, the present research shows the results of the determination of contained energy and CO₂ emissions associated with the concrete manufacturing process, considering as a case study a pre-mix plant in the city of Cuenca, through the application of A Simplified Life Cycle Analysis "from door to door".

When applying the "Life Cycle Inventory" (ICV) as established by ISO 14040: 2006, the study determined that to produce 1 m³ of premixed concrete requires 568.69 MJ, which generates emissions to the environment of 42, 83 kg of CO₂ / m³. The activity to which the highest percentage of energy consumption and CO₂ emissions are attributed corresponds to indirect transport (transport of raw material).

Keywords

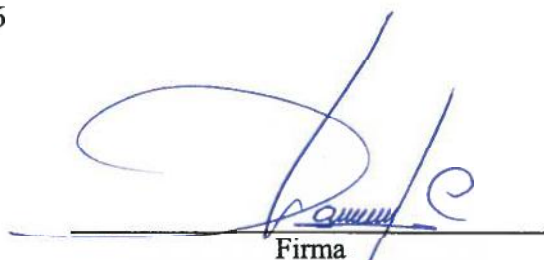
Life cycle assessment; inventory; energy contained; CO₂; ready-mixed concrete.



CLÁUSULA DE DERECHOS DE AUTOR

Karla Gabriela Vázquez Calle, autora del artículo científico “Análisis del Inventario del Ciclo de Vida en la determinación de la energía contenida y las emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación del hormigón premezclado; caso de estudio: planta premezcladora de la ciudad de Cuenca”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal C, de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Magister en Construcciones. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.

Cuenca, 29 de Noviembre de 2016



Firma

Karla Gabriela Vázquez Calle

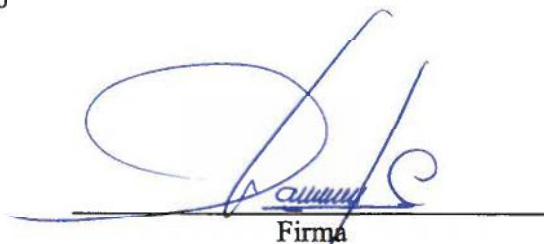
C.I.:0301852158



CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Karla Gabriela Vázquez Calle, autora del artículo científico “Análisis del Inventario del Ciclo de Vida en la determinación de la energía contenida y las emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación del hormigón premezclado; caso de estudio: planta premezcladora de la ciudad de Cuenca”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 29 de Noviembre de 2016



Firma

Karla Gabriela Vázquez Calle

C.I.: 0301852158



Análisis del Inventario del Ciclo de Vida en la determinación de la energía contenida y las emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación del hormigón premezclado; caso de estudio: planta premezcladora de la ciudad de Cuenca

Karla Gabriela Vázquez Calle.

Maestría en Construcciones III Cohorte, Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador.arqvaquezkarla24@hotmail.com

Vanessa Fernanda Guillén Mena.

Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador.vanessa.guillen@ucuenca.edu.ec.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel global, las industrias y el transporte son responsables del mayor consumo energético, seguido por el consumo residencial, el sector servicio y por último el sector primario (agricultura, agropecuario, pesquerías, acuicultura) (1). En América Latina y el Caribe, los sectores de mayor consumo de energía final son el transporte (35%) y la industria (33%) (1). En el Ecuador, el consumo del sector transporte representó 42% del total de la demanda en el 2014. La industria, la construcción, el sector residencial y los sectores comercial, así como de servicios público, demandan el 18%, 16%, 12% y 6%, respectivamente; mientras que, el 1% del consumo energético nacional corresponde al sector agropecuario, pesca y minería (2).

Según el IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) se advierte que el consumo de combustibles de origen fósil representa la mayor parte de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero de origen antropogénico, cuyas concentraciones de CO₂ al término del 2010 ya eran superiores en un 39% a los niveles preindustriales (3). Así, en la actualidad se han identificado problemas en cuanto a su uso tanto en el área socioeconómica, geopolítica y ambiental (4). En condiciones controladas, el efecto invernadero permite un clima estable en nuestro planeta, pero desde la era preindustrial, donde se han intensificado las actividades humanas, la concentración de estos gases se ha incrementado notablemente; lo cual se evidencia en las alteraciones drásticas del clima (5) (6).

Algunos de los GEI producidos en las actividades antropogénicas son: el Dióxido de Carbono (CO₂), el Metano (CH₄), el Óxido Nitroso (NO_x), los Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y el Hexafluoruro de Azufre (SF₆). (5); aunque todos los GEI mencionados están presentes en la atmósfera, los más destacados son el CO₂ por su abundancia y el CH₄ por su potencial de calentamiento global (5).

Desde el inicio de la revolución industrial, la utilización de combustibles de origen fósil (carbón, petróleo y gas) se ha incrementado en todo el mundo, hasta convertirse en el suministro de energía predominante, situación que ha dado lugar a un rápido aumento de las emisiones del dióxido de carbono (CO₂) (3), siendo el componente dominante de la Huella Ecológica de la humanidad durante más de medio siglo y continúa aumentando (7). Por ejemplo, en 1961, el carbono representaba el 36 % de nuestra Huella Ecológica (HE) total, mientras que en el 2010 alcanzó un porcentaje del 53%. En la

actualidad, la huella de carbono (HC) constituye más de la mitad de la Huella Ecológica Global total (7) (8) (9).

La construcción incluida su industria asociada, es la responsable del consumo de más del 40% de recursos naturales, de un 30% de energía y el 30% de las emisiones de gases de efecto invernadero (10). En lo referente al dispendio de recursos, la construcción de edificios consume el 40% de roca, arena y gravilla, además del 25% de madera no renovable y 16% del agua utilizada anualmente en el mundo (11) (12) (13). En la Unión Europea, esta misma actividad consume el 40% de los materiales, el 40% de la energía primaria y genera el 40% de los residuos (10). Esto causa el deterioro de la Tierra, agotamiento de los recursos, contaminación del aire y agua, contaminación acústica y la generación de residuos, además de la transformación del medio (14) (15).

Esta huella visible y perdurable que representa el ambiente construido en el planeta, se debe principalmente a que la industria de la construcción se basa en un modelo de producción de ciclo abierto, que se caracteriza por el consumo de materias primas y la generación de residuos (16). Estudios han determinado que por cada metro cuadrado de construcción habitable en el mundo ingresan a la obra 2.500 kg de materiales con una gran cantidad de impactos ambientales asociados (17) y que la energía para la fabricación de éstos, supone un consumo de unos 6.000 MJ (1.670 kWh) equivalentes a 150 litros de gasolina (17), situación que a su vez implica una emisión media de 0,5 toneladas de dióxido de carbono (18).

A la energía utilizada en la fabricación de un producto como los materiales de construcción, se le conoce como energía incorporada y se la expresa en MJ. Para su cuantificación, se considera el aporte energético de cada uno de los procesos requeridos para llevar el material a su lugar en el edificio desde la extracción de las materias primas, manufactura y construcción. Se debe incluir también la energía asociada al transporte, así como la parte proporcional de los equipos y maquinaria utilizada en todos esos procesos señalados. Los gases emitidos a la atmósfera por la fabricación de los materiales de construcción se mide en kg de CO₂ equivalentes (15) (19) (20).

Los materiales de construcción engloban aquellos elementos que entran a formar parte de los distintos tipos de obras arquitectónicas o de ingeniería, cualquiera que sea su naturaleza, los más empleados en el sector de la construcción son: el hormigón, piedra natural, tierra (arena y grava), ladrillo, yeso, materiales cerámicos, vidrio, plásticos, madera, aluminio, acero,



cobre, zinc, hierro y bronce (14). Los costes ecológicos mayores en cuanto a materiales de construcción se deben al consumo de los recursos naturales, al dispendio energético y a la generación de los residuos (15).

El impacto ambiental derivado de la producción de los materiales de construcción, se debe a que durante su proceso de fabricación han sido fuertemente manipulados, lo que implica grandes efectos medioambientales, puesto que gran cantidad de energía primaria es consumida (10). Estos efectos medioambientales negativos se presentan durante todas las fases del ciclo de vida de los materiales. Así, en la fase de adquisición de las materias primas, los efectos nocivos más comunes son los vinculados a la minería y las prácticas de explotación que afectan los diferentes hábitats, pues, causan la eliminación de la vegetación que aumenta la escorrentía, la pérdida de la capa superior del suelo y la sedimentación de los cursos de agua. En la fase de manufactura se generan emisiones y residuos que repercuten directamente sobre la calidad del aire, del agua y del suelo. En la fase de transporte de los materiales hasta el sitio de producción, utiliza combustibles no renovables y genera emisiones contaminantes al aire (14).

Los materiales utilizados para la estructura de los edificios representan más del 50% de la energía incorporada en la edificación (21). Se conoce también que la energía requerida por metro cuadrado para la fabricación de la estructura de acero es 25% menor que la necesaria para la fabricación de la estructura de hormigón. Sin embargo, teniendo en cuenta el ciclo de vida completo, el edificio con la estructura de acero tiene un mayor impacto en términos de energía primaria y de emisiones (18).

El hormigón es el material de construcción más empleado en el mundo, y tras el agua es el producto más consumido del planeta (22); se estima una producción anual de este material en 1.5 m³ por habitante del planeta (23), supone a su vez, el empleo de 1.6 billones de toneladas de cemento, 10 billones de toneladas de roca y arena y un billón de toneladas de agua (20) así como un alto consumo de combustibles fósiles (23). En este contexto, se destaca también que los combustibles fósiles y la manufactura del cemento son responsables de más del 75% del incremento del CO₂ atmosférico desde el periodo pre-industria del siglo XVIII (14) y que a la producción del cemento portland se le atribuye más del 8% del CO₂ derivado de las actividades humanas a nivel global (16).

Esta alta tasa de utilización de los recursos naturales y del medio ambiente, así como las emisiones de GEI, derivado de la industria de la construcción supone una disminución del potencial de los recursos para las generaciones futuras (24). De ahí la necesidad imperiosa de transformar las directrices de producción y consumo, desde los procesos abiertos generadores de residuos hacia procesos de ciclos cerrados que propendan a la optimización de recursos y respeto al medio ambiente (16).

1.1.- El Hormigón

La sociedad moderna, se ha desarrollado en base al uso creciente del hormigón en las más variadas formas de aplicación (25). Este material ha estado presente en las civilizaciones desde los albores de la sociedad. Investigaciones arqueológicas han evidenciado la existencia de concretos a base de cal en el templo de Göbekli Tepe provincia Sanliurfa en Turquía, con más de 11.600 años de

antigüedad. Siendo el concreto un factor clave para que el hombre dejara sus hábitos nómadas. En este contexto, la evolución y desarrollo de la humanidad se han sustentado en el cemento y el concreto, razón por la cual es importante conocer sobre este material, su impacto en el medio ambiente y como se lo puede utilizar en nuestro beneficio con criterios de sustentabilidad (16).

En el sector de la construcción el hormigón es empleado debido a sus excelentes características como; una buena resistencia a compresión, un buen comportamiento a fatiga, una excelente resistencia al agua, un buen comportamiento frente al fuego y requiere un bajo coste de mantenimiento (14). El hormigón premezclado es un hormigón dosificado en una central hormigonera, mezclado en la misma central o en un camión mezclador, transportado a un lugar determinado y entregado en el sitio de descarga (20).

Este material está constituido básicamente por la mezcla de: cemento y agua (pasta), árido fino y árido grueso; también puede contener aditivos que mejoran sus propiedades tanto en estado fresco como endurecido (14), siendo los más usados los aditivos reductores de agua, superplastificante e incorporadores de aire (20). La pasta constituye aproximadamente entre el 25% y 40% del volumen total del hormigón, mientras que los agregados conforman aproximadamente entre el 60% al 75% (26).

Entre todos los componentes del hormigón, el agregado juega un papel crucial debido a su alta presencia en el volumen total de concreto. Los áridos se dividen en dos grupos: agregados finos que pueden ser la arena natural o manufacturada, con partículas de hasta 9.5 mm (3/8 pulg); y los agregados gruesos que son partículas detenidas en la malla 1.18 mm (tamiz n°16) y que pueden llegar hasta 150 mm (6 pulg.) (14).

En cuanto a los impactos ambientales, el empleo del hormigón implica grandes costes debido a los altos niveles de energía consumida y CO₂ liberado durante su fabricación, principalmente en el proceso de producción del cemento como uno de sus principales componentes; así como en la obtención de áridos y materias primas requeridas, lo que implica la destrucción de ciertos hábitats y causa problemas de contaminación en el aire y agua de la zona (14).

Ante esta problemática global, la sociedad ha enfocado sus esfuerzos en definir acciones concretas para frenar los efectos negativos causados en la naturaleza por la acción del hombre (3). Una de las labores emprendidas es el desarrollo de herramientas metodológicas que permiten cuantificar y valorar los impactos ambientales generados en cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto, siendo el Análisis de Ciclo de Vida una de las herramientas más utilizadas (20).

1.2.- Análisis del Ciclo de Vida (ACV)

El ACV es una metodología objetiva y con base científica empleada para evaluar los aspectos medioambientales y los impactos potenciales asociados a un producto o servicio (27). Se fundamenta en: la recopilación de un inventario de las entradas/salidas relevantes del sistema bajo estudio, la evaluación de los impactos medioambientales y la interpretación de los resultados de acuerdo con los objetivos establecidos al inicio del estudio (28) (29) (30).

UNIVERSIDAD DE CUENCA

El ACV, está estandarizado en las normas ISO 14040:2006 llamada Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y Marcos de Referencia y la ISO 14044, de la Organización Internacional de Normalización (29).

De acuerdo con la ISO 14040:2006, el ACV consta de cuatro fases como se muestra en la Figura 1.

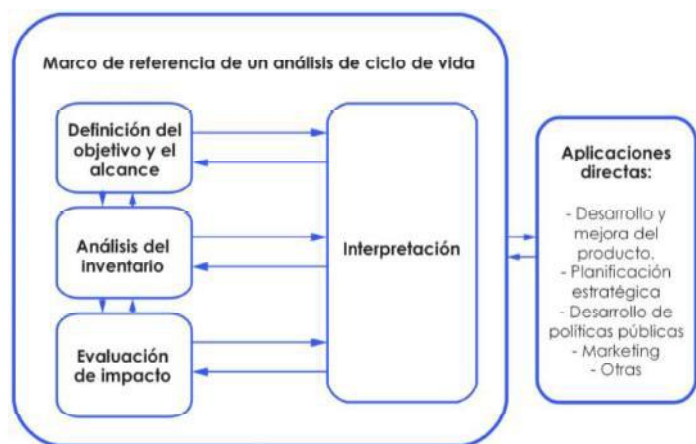


Fig. 1 Estructura del ACV. ISO 14040:2006 (29)

- **Definición de objetivos y alcance**, determina el uso previsto y el alcance que tendrá el estudio de acuerdo a los límites del sistema, la unidad funcional, los flujos dentro del ciclo de vida así como los parámetros tecnológicos y de evaluación.
- **El análisis de inventario del Ciclo de Vida (ICV)**, fase en la cual se recogen los datos correspondientes a las entradas y salidas para todos los procesos del sistema de producto.
- **Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV)**, en la cual, los datos que fueron recogidos en el inventario de entradas y salidas, son traducidos a indicadores de potenciales impactos ambientales.

- **Interpretación**, en la cual los resultados del ICV y el EICV son interpretados de acuerdo a los objetivos y alcance determinado inicialmente, concluyendo con un análisis de resultados y la formulación de conclusiones (29).

En la metodología descrita, las fases de trabajo del ACV se encuentran interrelacionadas y siguen una secuencia más o menos definida; aunque en ocasiones, es posible realizar un estudio obviando alguna fase, lo que se conoce como un ACV simplificado (20) (29). En este sentido, la norma ISO 14040:2006, abarca dos tipos de estudios: El análisis del ciclo de vida (estudios de ACV) y análisis del inventario del ciclo de vida (estudios de ICV). Los estudios de ICV son similares a los estudios de ACV, pero excluyen la fase EICV (evaluación del impacto del ciclo de vida) (29).

Los elementos que se consideran dentro de un ACV, se conocen como inputs/outputs (entradas/salidas). Los inputs hacen referencia al uso de recursos y materias primas, productos, transporte, electricidad, energía, etc, mismos que se tienen en cuenta en cada proceso o fase del sistema. Los outputs son las emisiones al aire, al agua y al suelo, así como los residuos y los subproductos que se tienen en cuenta en cada proceso o fase del sistema (31) (32).

En la Figura 2, se presentan los diferentes alcances que pueden tener los estudios del ACV, así se denomina: “*de la cuna a la tumba*” cuando el ACV de un producto incluye todas las entradas y salidas de los procesos que participan a lo largo de su ciclo de vida, partiendo desde la extracción de materias primas y el procesamiento de los materiales necesarios para la manufactura de componentes, el uso del producto y finalmente su reciclaje y/o la gestión final. Así como, el transporte, almacenaje, distribución y otras actividades intermedias entre las fases del ciclo de vida; “*de la cuna a la puerta*” cuando el alcance del sistema se limita a las entradas y salidas desde que se obtienen las materias primas hasta que el producto se pone en el mercado (a la salida de la

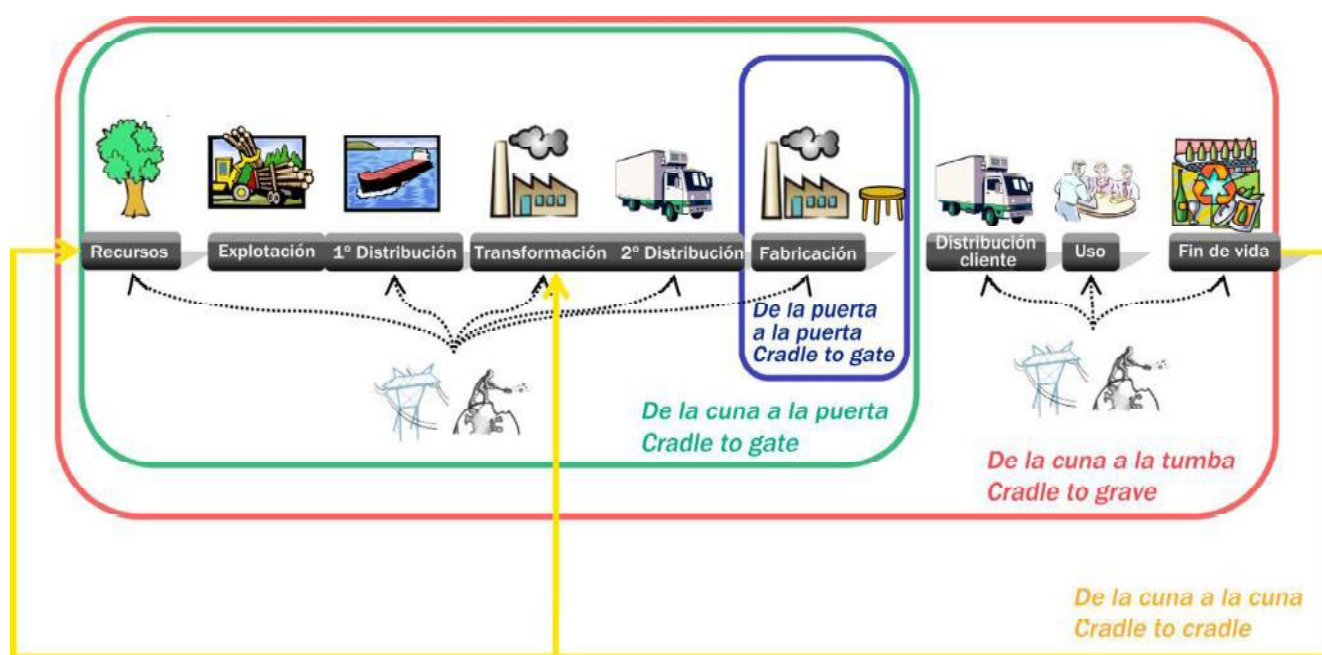


Fig. 2 Terminología relacionada con el alcance de un ACV (32).



planta de fabricación/montaje); y “de la puerta a la puerta”, cuando se consideran las entradas y salidas del sistema productivo; es decir, se considera el proceso de fabricación del producto (32).

A nivel global, son varias las investigaciones realizadas dentro del ámbito del ACV de los materiales de construcción (20), (32), (17), (33), (18), (27), donde han determinado, entre otros aspectos, la energía contenida en los materiales de construcción y sus correspondientes impactos ambientales.

En lo que se refiere a la energía incluida en el proceso de fabricación del hormigón premezclado, se determinó que en Catalunya para producir 1 kg de hormigón se requiere 1 MJ (34); en Chile el consumo es de 342 MJ por metro cúbico, mientras que según las bases de datos internacionales Ecoinvent e ICE, los valores son de 55,95 MJ y 547,2 MJ por metro cúbico de hormigón producido respectivamente (20). En cuanto a las emisiones de CO₂, el estudio de Chile y las bases Ecoinvent e ICE han determinado que en la producción de un metro cúbico de hormigón se emiten al ambiente: 25,90 kg CO₂; 256,78 kg CO₂ y 74,90 kg CO₂, respectivamente (20).

Analizando estos datos, se evidencia que el rango entre los resultados de las investigaciones citadas es muy amplio, lo cual impide establecer un patrón o dato de referencia que pueda ser aplicado en el Ecuador. Situación que ha motivado la realización de la presente investigación, pues mediante el desarrollo de la misma, se podrán determinar los valores de energía contenida y emisiones de CO₂ que respondan a la realidad del país. Además, se establecerá la situación del Ecuador con respecto al contexto global mediante la comparación de los resultados obtenidos en la presente investigación, con los datos tomados de bases internacionales o estudios similares realizados en otros países.

1.3.- El sector de la construcción en Ecuador y el hormigón como material predominante

Según el Balance energético Nacional 2015, al sector de la construcción en el Ecuador se le atribuye el 16 % del consumo nacional de energía, solo después del transporte y la industria (2). En la última década, la construcción representa el tercer sector con mayor crecimiento en el país con un 85,52 %. Este crecimiento tiene relación directa con el aumento de la obra pública, la obra de vivienda pública y privada. En lo referente a la inversión pública, ésta se ha enfocado principalmente en el desarrollo de infraestructura (35).

En el Ecuador, 32 de las 1.000 empresas más grandes pertenecen al sector de la construcción y, si bien su participación en los ingresos totales se ubica únicamente en 3,39%, se establece como uno de los sectores con mayor rentabilidad promedio en el 2014 (9,05%) (35). Según fuente de la Superintendencia de Compañías, Valores y Seguros, Superintendencia de Bancos y Superintendencia de Economía Popular y Solidaria, corte 2015; el sector de la construcción durante el año 2015, reportó 3.020,30 USD millones en ingresos y 233,7 USD millones en utilidades (36).

De acuerdo al Anuario de Edificaciones 2014 del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) en el Ecuador, durante el año 2014 se han concedido 27.199 Permisos de Construcción por parte de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales del país; de los cuales, el 89,48 % corresponden a

obra nueva, seguido por ampliaciones con el 9,38% y reconstrucciones el 1,14%. Del total de permisos emitidos para nuevas construcciones (24.337), el 88,04% corresponde a proyectos de uso residencial, el 7,15% destinado al uso no residencial, y 4,81% para construcción mixta. En lo referente al uso de los materiales de construcción, del total de permisos concedidos, el material predominante es el hormigón con el 80,86% de las edificaciones que lo emplean en su cimentación, el 93,77% en su estructura y el 56,05% para cubierta o techo (37).

En este contexto, el hormigón es el material predominante en el sector de la construcción en el Ecuador pero no se cuenta en el país con una base de datos de los materiales de construcción generada mediante la aplicación de la metodología del ACV. Por este motivo, la presente investigación tiene como objetivo, aportar con la cuantificación de la energía contenida y las emisiones de CO₂ asociados a la producción del hormigón. El trabajo aportará también con la metodología de cuantificación de energía contenida y emisiones de CO₂ que podrá ser aplicada en estudios de otros materiales, con la finalidad de generar una base de datos nacional con los principales materiales de construcción.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El tema propuesto se enmarca dentro del proyecto de investigación “Método de Certificación de la Construcción Sustentable de Viviendas”, que resultó ganador del XIII Concurso Universitario de Proyectos de Investigación convocado por la Universidad de Cuenca (38).

2.1. Metodología

La investigación presenta un enfoque cuantitativo de tipo no experimental longitudinal realizado durante un año calendario. Para la determinación de la energía contenida y las emisiones de CO₂ derivados de la fabricación del hormigón premezclado, se utiliza como herramienta de gestión el “Análisis de Ciclo de Vida”, de acuerdo a los principios establecidos en la norma ISO 14040: 2006 (Environmental management-Lifecycle assessment-Principles and framework) (20).

Para el estudio se aplicó un ICV (Análisis del Inventario del Ciclo de Vida); para lo cual, y conforme la norma citada (29), se seguirá los pasos descritos a continuación:

1. Definir el objetivo, los límites del sistema, la unidad funcional y alcance del estudio del ICV del proceso de fabricación del hormigón premezclado.
2. Construir un Inventario (ICV) del proceso de fabricación del hormigón premezclado, mediante la obtención y cuantificación de los datos de entradas (energía) y salidas (emisiones de CO₂) pertinentes al sistema de producción, a partir del estudio de una planta premezcladora de la ciudad de Cuenca.
3. Analizar los resultados obtenidos del ICV, mediante un estudio comparativo de los valores obtenidos del caso de estudio de la planta premezcladora de la ciudad de Cuenca, con los datos de investigaciones científicas similares realizados en otros países y con datos reportados por bases internacionales.

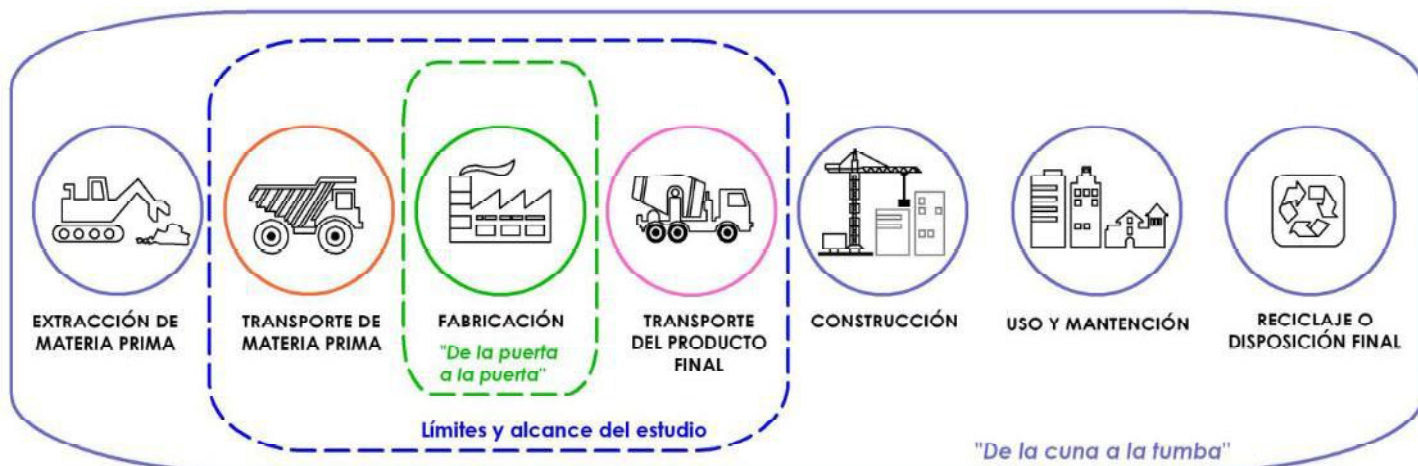


Fig. 3 Diagrama de las Etapas del Análisis de Ciclo de Vida del Hormigón-Definición de límites y alcance del estudio.

2.2. Caso de Estudio

El estudio se realizó en una planta premezcladora de la ciudad de Cuenca, ubicada en la provincia del Azuay, la cual alcanzó una producción anual de hormigón premezclado al 2015 de 107.386 m³. Esta investigación se ejecutó mediante la firma de un “Acuerdo de Confidencialidad” entre la planta premezcladora – caso de estudio y la Universidad de Cuenca.

2.2.1.- Definición de objetivo, alcance del estudio y unidad funcional

• Objetivo

Determinar la energía contenida y las emisiones de CO₂ asociadas al proceso de fabricación del hormigón premezclado, tomando como caso de estudio una planta premezcladora de la ciudad de Cuenca; para posteriormente, realizar un estudio comparativo de los resultados obtenidos del ICV con los datos de estudios científicos similares elaborados en otros países y con valores proporcionados por bases internacionales.

• Alcance y límites del sistema

La cuantificación de la energía contenida y las emisiones de CO₂ del material de construcción estudiado, se efectuó mediante la aplicación de un ACV simplificado (estudio de ICV), con un alcance “de la puerta a la puerta”, tomando en consideración la etapa previa de transporte de materia prima y la etapa posterior de entrega del producto final en obra (ver Figura 3). En los límites del sistema se consideró únicamente los flujos elementales de la cadena productiva de fabricación, dejando de lado los consumos energéticos resultado de la administración y el empleo de recursos humanos en el proceso (20).

La temporalidad considerada para la toma de datos y su posterior cuantificación, fue de un año calendario, periodo comprendido entre el 1 de enero al 31 de diciembre de 2015.

Para el estudio se cuantificó el consumo de energía empleado en el proceso de fabricación del hormigón premezclado; identificando el tipo de máquinas y equipos empleados en las etapas de recepción de materias primas, dosificación, mezclado

y llenado de camiones (dentro de los límites de la planta); así como la energía empleada en la operación de los camiones mixer (transporte de producto final hacia los puntos de despacho) y el transporte de materia prima (fuera de los límites de la planta).

• Unidad Funcional

Conforme lo establece la norma ISO 14040:2006, se definió una unidad funcional que para este estudio corresponde a m³/año y un flujo de referencia expresado en MJ/año; unidades que fueron tomadas de la investigación (20), con el objetivo de realizar una comparación final entre los datos obtenidos de nuestro caso de estudio, con los resultados de la investigación citada. La energía contenida anual se cuantificará en MJ/m³ de hormigón producido y los gases emitidos a la atmósfera serán expresados en kgCO₂/m³ del material fabricado (15) (19) (20).

2.2.2.- Inventario del Ciclo de Vida (ICV)

En la construcción del ICV, se consideraron las entradas y salidas de cada uno de los procesos unitarios señalados en el diagrama del proceso de fabricación del hormigón premezclado, proporcionado por la planta premezcladora del caso de estudio (ver Figura 4).

La obtención de información para el inventario se realizó aplicando el criterio de inclusión de datos, que considera como información primaria, las bases de datos de la producción mensual y anual de la planta premezcladora de hormigón estudiada, para la temporalidad correspondiente a un año (2015).

Sin embargo, en lo referente a la cuantificación de la entrada de combustible por concepto de transporte de materia prima, al no contar la planta premezcladora con esta información se debió levantar y cuantificar la misma, en base a los datos proporcionados por todos los proveedores.

En lo referente a la cuantificación, el procesamiento de datos y la obtención de resultados se realizó mediante la aplicación de herramientas estadísticas de tendencia central como la media aritmética (\bar{Y}), para resumir en un solo valor a un conjunto de valores (39) y de dispersión como la desviación estándar, para

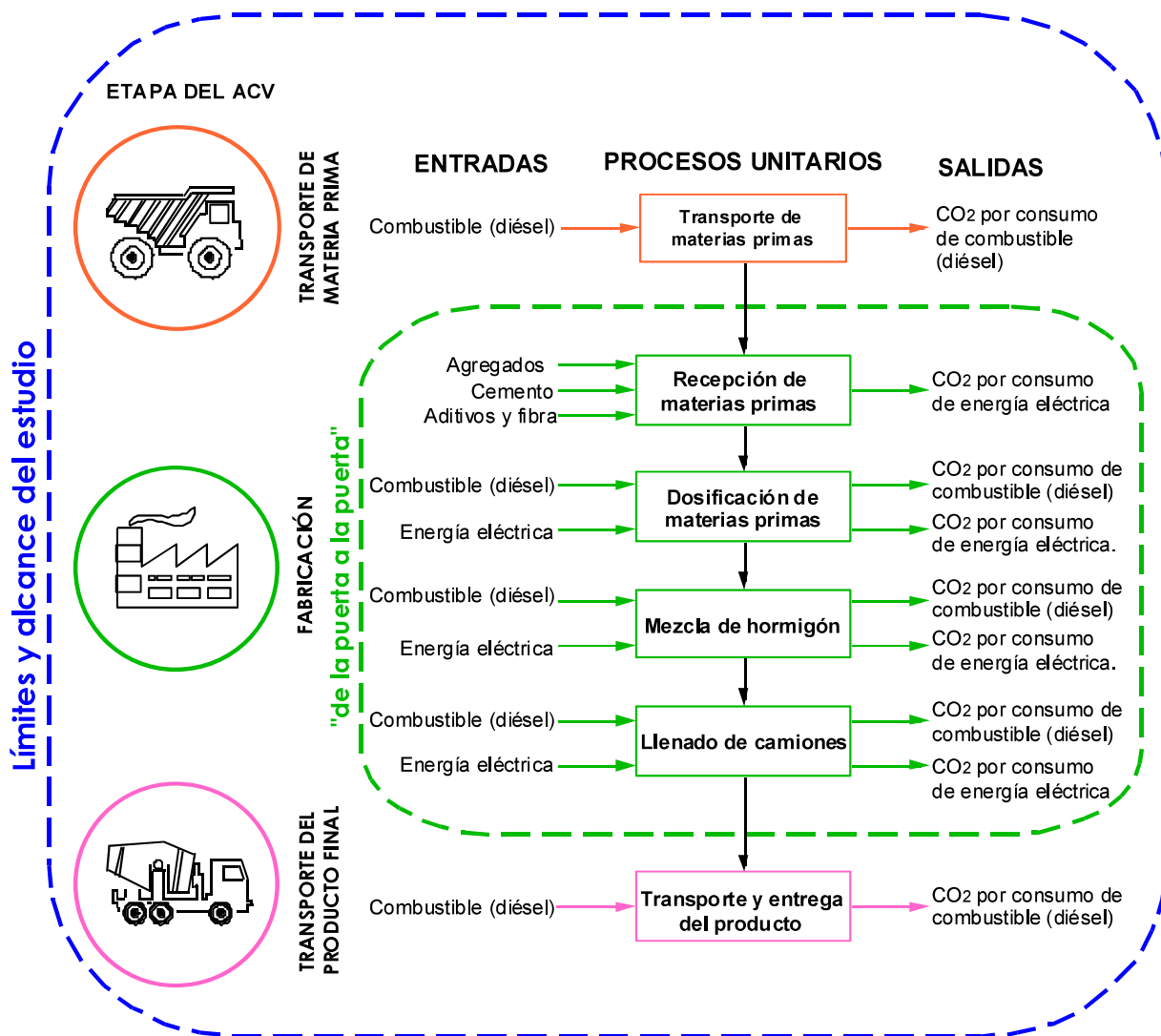


Fig. 4 Diagrama del proceso de fabricación del hormigón: Caso de estudio – planta premezcladora de la ciudad de Cuenca.

determinar el grado de variabilidad existente en el grupo de datos que fueron procesados.

2.2.2.1.- Datos del Inventario

2.2.2.1.1.- Entradas: materias primas, combustibles y energía eléctrica.

a) Materias primas

- Áridos gruesos: grava de $\frac{3}{4}$, triturado de $\frac{3}{4}$, triturado de $\frac{3}{8}$.
- Árido fino: arena.
- Cemento a granel.
- Aditivos químicos.

b) Combustible

- Transporte directo (dentro de los límites de la planta): cargadores frontales y camiones mixer durante la etapa de carga de materia prima y el mezclado del hormigón.
- Transporte indirecto (transporte de materia prima): traslado de materias primas desde el lugar de origen hasta la planta premezcladora.

- Transporte del producto final (hormigón premezclado): fuera de los límites de la planta hasta los diferentes puntos de despacho en obra.

c) Energía Eléctrica (EE): para el funcionamiento de la planta dosificadora y las básculas de ingreso a la planta.

2.2.2.1.2.- Salidas: corresponden principalmente al producto final obtenido (hormigón), así como las emisiones de CO_2 derivadas del consumo de energía eléctrica y combustible en los diferentes procesos unitarios de la fabricación del hormigón premezclado.

- Hormigón premezclado: se consideró la totalidad del volumen de hormigón producido (m^3) por la planta premezcladora durante un año como un solo tipo de hormigón, el cual es considerado como el producto final (20).
- Emisiones de CO_2 : emisiones directas (transporte dentro de los límites de la planta), emisiones indirectas (por concepto de transporte de materia prima), emisiones por transporte del producto final (despacho del hormigón hacia las obras) y las emisiones producidas por el consumo eléctrico de la planta en el proceso de producción del hormigón.



2.2.2.2.- Procedimiento de cálculo para determinar las entradas y salidas (inputs y outputs) pertinentes al sistema de producción del hormigón premezclado

2.2.2.2.1.- Cálculo de entradas

Se cuantificó el volumen total de cada una de las materias primas que ingresaron cada mes a los límites de la planta durante el año de estudio, mediante el tonelaje marcado en la báscula tanto del ingreso como salida de cada una de las unidades que transportan la materia prima desde los lugares de origen, cuya diferencia determina el tonelaje neto del material que ingresa a la planta en cada despacho de los diferentes proveedores.

En lo referente al consumo de **energía eléctrica** (EE), la empresa proporcionó la información mensual y anual de consumo eléctrico del año de estudio, mediante una cuantificación diferenciada entre el consumo de EE empleado para la producción del hormigón (funcionamiento de la planta entre 07:00 am a 22:00 pm) y la EE de la planta (funcionamiento entre 22:00 pm y 07:00 am). Para la cuantificación de la entrada por concepto de energía eléctrica se consideró únicamente el consumo neto correspondiente a la producción del hormigón, el cual se obtuvo de la diferencia entre la EE total consumida en el periodo de 07:00 am a 22:00 pm y el consumo de EE del bloque administrativo en el mismo horario.

Con respecto a las entradas de energía asociadas al consumo de combustible por *transporte directo* (dentro de los límites de la planta), se consideró tanto el consumo mensual y anual de combustible (diésel) empleado en el funcionamiento de la cargadora frontal durante el proceso unitario de dosificación de materias primas; así como, el consumo de combustible del mixer durante la etapa denominada *de carga* (dentro de los límites de la planta).

Las entradas de energía por concepto de *transporte indirecto* (proveedores de materia prima) fueron cuantificadas a partir del consumo de combustible de las unidades de transporte pesado en cada uno de los despachos desde el lugar de origen hasta los límites de la planta premezcladora. Al no contar la empresa con toda la información requerida, los datos complementarios fueron proporcionados por cada uno de los proveedores de: agregados, cemento a granel y aditivos químicos, mediante el llenado de matrices en las que se contempló información como: el tipo de material y la cantidad transportada en cada viaje, el tipo de vehículo transportador, su tonelaje máximo y el tipo de combustible requerido para su funcionamiento, la distancia recorrida por cada unidad de transporte desde el lugar de origen hasta los límites de la planta, el tiempo empleado en recorrer dicha distancia, el rendimiento de los camiones, la velocidad promedio tanto del viaje de ida como de regreso, el consumo de combustible por ciclo de viaje y las condiciones de retorno hacia el lugar de origen (vacío o cargado). Según lo señala PAS 2050 (Especificación para la evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida de bienes y servicios), la huella de carbono aumenta si el camión regresa vacío a su lugar de origen (20) (ver anexo 10).

Finalmente, la cuantificación del consumo de combustible anual por transporte indirecto, se realizó mediante la tabulación de los datos constantes en las matrices llenadas por los proveedores y la información complementaria que fue tomada de las bases de datos de la planta premezcladora. Estos datos corresponden a: el

tonelaje neto de cada despacho de materia prima que ingresó diariamente a la planta durante el año de estudio; así como, el número de viajes diarios de cada material transportado y de cada proveedor durante la temporalidad estudiada.

Para las entradas de energía por concepto de **transporte del producto final** (hormigón premezclado), se consideró el consumo mensual y anual de combustible (diésel) empleado en el funcionamiento del mixer en el proceso unitario de transporte y entrega del producto fuera de los límites de la planta, sumado a la cuantificación de consumo del viaje de regreso del camión mixer a la planta debido a que todas las unidades regresan vacías.

2.2.2.2.2.- Cálculo de salidas

a) Producto final

Se realizó la sumatoria de la producción mensual del hormigón premezclado, considerando el volumen producido de hormigón como un solo tipo, en la temporalidad estudiada año 2015; información que fue tomada de las bases de datos de la empresa estudiada.

b) Emisiones de CO₂

Para la cuantificación de las emisiones de CO₂, el procedimiento contempló las energías aportadas por: transporte indirecto, transporte directo, transporte de hormigón a la obra y consumo de energía eléctrica de los flujos elementales de la cadena productiva de fabricación (sin considerar los consumos energéticos del área administrativa), así como los factores de emisión de cada energía de acuerdo a su fuente de generación, que para el caso del transporte terrestre es el combustible (diésel) y para la energía de la planta, es la energía eléctrica proveniente del SIN (Sistema Nacional Interconectado) del Ecuador al año 2015.

De acuerdo a la fuente de generación de energía utilizada en cada proceso unitario de la fabricación del hormigón premezclado (diésel o energía eléctrica), se realizó un procedimiento particular para la cuantificación de las emisiones de CO₂, el cual se detalla a continuación:

➤ Emisiones de CO₂ por transporte

Para la cuantificación de las emisiones de CO₂ por concepto de los diferentes tipos de transporte terrestre considerados en este estudio, al no contar en el país con datos específicos de factores de emisión referentes a dicha actividad, se tomó con referencia la metodología del estudio (40), en el cual establece el siguiente procedimiento (ver Anexo 7):

- Determinación del consumo total de combustible por concepto de transporte terrestre en litros, para la temporalidad estudiada.
- Conforme lo señala la SEAP Guidelines Part II, Baseline Emissions Inventory se realiza la conversión del total de combustible empleado en transporte terrestre (litros de combustible) a energía consumida (kWh), mediante el factor de conversión (kWh/l) establecido según el tipo de combustible de acuerdo a la Tabla 1.



Tabla 1. Conversion factors for the most typical transportation fuels (EMEP/EEA 2009; IPCC, 2006) (38).

Fuel	Conversion factor (kWh/l)
Gasoline	9.2
Diesel	10.0

- Finalmente, se aplican los factores de emisión: 249 g de CO₂/kWh para la gasolina y 267 g de CO₂/kWh para los carburantes a diésel, cuantificando así las emisiones de CO₂ por concepto de transporte terrestre.

➤ Emisiones de CO₂ por consumo de energía eléctrica

Para esta cuantificación, se utilizó el resultado obtenido del consumo de energía eléctrica anual empleado en la producción del hormigón en la planta premezcladora del caso de estudio, multiplicado por el factor de emisión de CO₂ del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador, determinado por la Comisión Técnica de Determinación de Factores de Emisión de Gases Efecto Invernadero del Ecuador, de acuerdo a la metodología establecida en el documento “Herramienta para el cálculo del factor de emisión de CO₂ para un sistema eléctrico”, versión V5.0 de la UNFCCC, y publicado en el informe 2016 del CENACE. En el informe se señala que para estimar las toneladas equivalentes de CO₂ emitidas al ambiente se debe considerar el margen de operación OM¹ según el año de estudio, mismo que para la temporalidad estudiada (año 2015) es de 0.6760 tCO₂/MWh eq (ver Anexo 8).

Finalmente a partir de la sumatoria de las emisiones anuales de CO₂ aportadas por el consumo de combustible por concepto de transporte terrestre así como por las emisiones por consumo de energía eléctrica, se determina el total de emisiones de CO₂ anual al ambiente por efecto de la producción del volumen total de hormigón de la planta premezcladora del caso de estudio. La cuantificación de los datos se realizó mediante el empleo de hojas de cálculo.

3. RESULTADOS

3.1.- Entradas

3.1.1.- Consumo de materias primas

Son seis las materias primas que ingresaron a la planta durante el año de estudio (sin considerar el agua²), siendo el agregado fino el de mayor incidencia de consumo (ver Figura 5), alcanzando un total equivalente al 40.82 % del consumo total anual de materias primas componentes del hormigón premezclado (ver Figura 6), mientras que el material de menos consumo es el aditivo químico con un porcentaje del 0.22 %.

Analizando la información presentada en las Figuras 5 y 6, se determina claramente que los agregados son los materiales componentes de hormigón de mayor consumo, alcanzando un

total general equivalente al 83,83% del volumen total del consumo de materia prima anual en la planta premezcladora caso de estudio.



Fig. 5 Gráfico de consumo anual de materia prima.

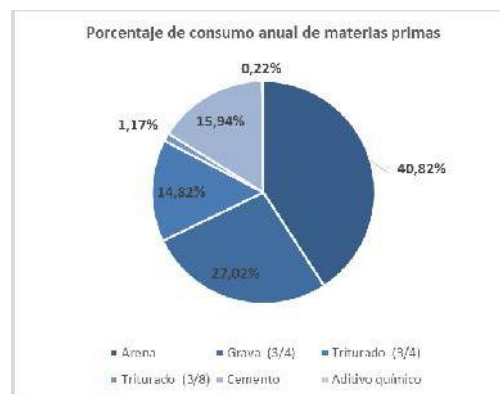


Fig. 6 Gráfico porcentaje de consumo anual de materias primas.

3.1.2.- Consumo de combustible

• Transporte Indirecto

En lo referente al consumo de combustible anual por transporte indirecto, considerando los traslados de cada una de las materias primas empleadas para la fabricación del hormigón premezclado desde su lugar de origen hasta la planta y el viaje de regreso (ya que la unidad de transporte regresa vacía); para el periodo de estudio (año 2015), fue de 443.653 galones de diésel (1.679 m³).



Fig. 7 Gráfico de consumo de combustible por transporte indirecto.

¹ Margen de operación (OM), es el factor de emisión del CO₂ que se estima con la operación de las centrales actualmente conectadas a la red (43).

² El agua como componente del hormigón, alcanzó un consumo anual de 3.978,69 m³, inmerso en un consumo general de agua en la planta de 22.637,01 m³. El consumo de este material no se

considera en la cuantificación general de materia prima que ingresa a la planta, ni en la cuantificación de energía contenida y emisiones de CO₂ debido a que el agua utilizada para la producción del hormigón proviene de la red pública, por lo que no supone un gasto energético ni de emisiones en su ingreso a la planta.

En la Figura 7, se aprecia que el mayor gasto de combustible corresponde al transporte del árido fino (arena) cuyo total de consumo equivale al 34,6% a diferencia del aditivo químico el material de menor incidencia con un aporte del 0.3%. Los datos acerca de los porcentajes colaborantes en cuanto a consumo de combustible por transporte indirecto se presentan en la Figura 8.

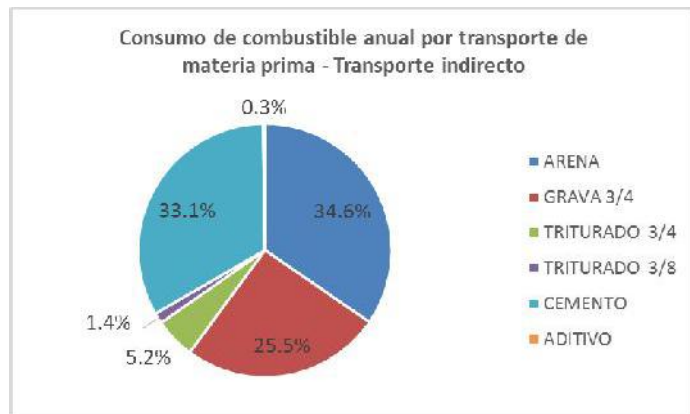


Fig. 8 Gráfico de porcentajes de consumo de combustible por tipo de materia prima.

Analizando conjuntamente los datos obtenidos tanto del consumo de materias primas, así como, de combustible por transporte indirecto; el árido fino es el material de mayor incidencia en los dos aspectos, alcanzando porcentajes del 40,82% y 34,6% respectivamente; a diferencia de los que sucede con el cemento, material que ocupa el tercer lugar en cuanto a consumo de materias primas, y el segundo en consumo de combustibles por su transporte con porcentajes equivalentes al 15,94% y 33,1% respectivamente.

Este incremento notable en cuanto a consumo de combustible por transporte de cemento con respecto al volumen de ingreso de dicho material, se debe a dos factores relevantes: el número de despachos de esta materia prima por parte del proveedor, que durante el año de estudio fue de 1.181 traslados (ver Figura 9), y la distancia existente entre el punto de despacho del cemento (Guayaquil) y la planta caso de estudio (Cuenca), que en promedio es de 578 km recorridos por la unidad de transporte pesado en el ciclo completo de cada viaje (ida y regreso).



Fig. 9 Gráfico de número total de traslados de materia prima al año.

En analogía con los resultados del consumo de materia prima, el material que reporta menor gasto de combustible por transporte

indirecto es el aditivo químico, mismo que genera un consumo total anual equivalente al 0.3%. Este resultado puede ser explicado a razón de que, a pesar de que la distancia total recorrida en el ciclo completo del viaje (ida y regreso) entre el punto de despacho del aditivo químico (Guayaquil) y la planta premezcladora (Cuenca) que en promedio es de 550 km, el número anual de despachos de esta materia prima desde su lugar de origen hacia la planta fue únicamente de 46 viajes frente a los 7.323 despachos por el suministro de agregados hacia la planta premezcladora durante el año de estudio, resultados expresados en la Figura 9.

• Transporte Directo

Comprende el transporte de los materiales dentro de los límites de la planta que para el caso puntual del estudio, hace referencia al combustible (diésel) empleado por la cargadora frontal que transporta los agregados durante la etapa de dosificación del hormigón, que para la temporalidad estudiada se cuantificó en 5.290,28 galones de diésel, equivalente al 33%; y el combustible (diésel) empleado por los camiones mixer durante la etapa de mezclado y homogenización del producto (ver anexo 3), que de acuerdo al ciclo promedio de producción del hormigón en la planta caso de estudio, tiene una duración de 14.8 min por cada uno de los despachos de producto final, que para el periodo anual de estudio se cuantificó en 10.681 galones de diésel equivalente al 67% del consumo de combustible por concepto de transporte directo (ver Figura 10).

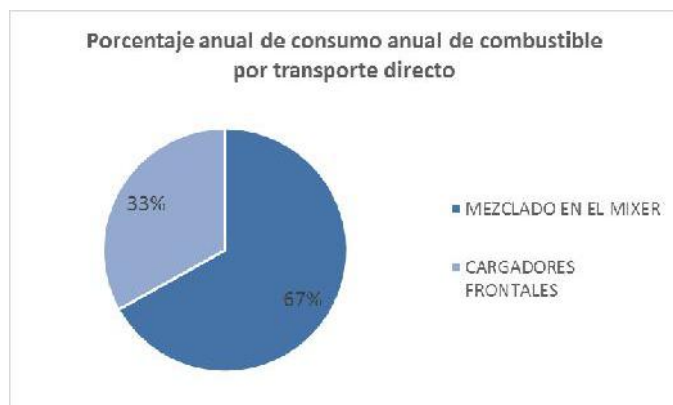


Fig. 10 Gráfico de porcentajes de consumo anual de combustible por transporte directo.

• Transporte del producto final a la obra

El consumo anual de combustible (diésel) por parte de los camiones mixer en el proceso unitario de transporte del producto final fuera de los límites de la planta, alcanzó un gasto total anual de 69.891 galones de diésel para un recorrido total anual de 308.826 km por concepto de despacho del producto final hacia los diferentes puntos de despacho incluido el viaje de regreso, con una distancia promedio recorrida por cada entrega de 17,66 km, en un número total de despachos de 17.482 en el año 2015.

Haciendo un análisis general del consumo de combustible de la planta premezcladora caso de estudio por concepto del transporte (ver anexo 2), en la Figura 11, se puede identificar claramente

que el mayor porcentaje de consumo total anual de combustible se debe al *transporte indirecto* (materias primas), el cual alcanza el 81% del gasto total anual de combustible (diésel), y apenas el 4% del consumo total corresponde al transporte directo dentro de los límites de la planta.

Este amplio margen de diferencia entre el porcentaje de consumo de combustible por *transporte indirecto* y los otros dos tipos de transporte señalado en este estudio, se debe a factores intrínsecos del transporte de materia prima como son: la distancia recorrida por despacho de los materiales por parte de los proveedores en el ciclo total de transporte (lugar de origen – planta – lugar de origen), el volumen de materias primas entrantes a la planta, la frecuencia de entrega y el número total de despachos de materias primas.

El total de despachos de los diferentes proveedores en el periodo de estudio se presentan en la Figura 9, dando como resultado un consumo total anual de combustible por *transporte indirecto* equivalente a cuadruplicar la sumatoria del consumo de transporte directo y el transporte del producto final durante el periodo de estudio.

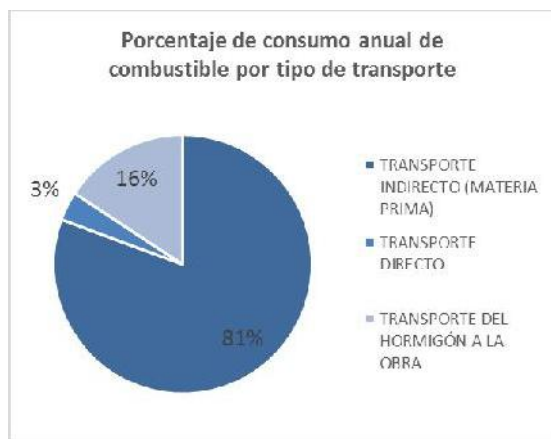


Fig. 11 Gráfico porcentaje de consumo anual de combustible por tipo de transporte.

A raíz de los resultados obtenidos en la Figura 11, a continuación se presentan algunos resultados adicionales en cuanto al transporte de materia prima, dada su alta incidencia del consumo de combustible por ese concepto en relación al consumo total anual de combustible en la planta caso de estudio.

Los agregados empleados en la fabricación del hormigón premezclado son entregados por tres proveedores, dos de los cuales están ubicados en el sector de Santa Isabel, punto distante de la planta premezcladora en un promedio de 107 km, mientras que el tercer proveedor de agregados está ubicado en el sector conocido como el Descanso, el cual, se encuentra a una distancia promedio de 15 km de la planta de estudio; los tres puntos de despacho se encuentran ubicados en la provincia del Azuay.

El número total anual de entregas (traslado de la unidad de transporte) de materia prima desde el punto de Santa Isabel fue de 5.174, mientras que desde la mina del Descanso se despacharon 2.149 viajes de materia prima; siendo las entregas desde el punto de Santa Isabel, aproximadamente el doble de los despachos de materia prima efectuados desde el Descanso; situación que sin duda influye en el elevado consumo de

combustible por transporte indirecto debido a: la distancia existente entre el lugar de origen de los agregados y la planta premezcladora del caso de estudio, la frecuencia de entregas anuales y las condiciones de retorno de las unidades de transporte pesado que en su totalidad regresan al lugar de origen vacíos, lo que aumenta la huella de carbono del producto (ver Anexo 1).

3.1.3.- Consumo de energía eléctrica (EE)

Para el gasto de energía eléctrica se consideró el consumo neto correspondiente únicamente al uso de EE en las actividades propias de producción del hormigón; es decir, se consideraron solamente los flujos eléctricos asociados a los procesos unitarios de recepción y dosificación de materia prima, mezclado de hormigón y llenado de camiones mixer.

El consumo de energía total anual de la planta caso de estudio alcanzó los 919.688 MJ, distribuidos de acuerdo a los dos horarios establecidos por la planta premezcladora de acuerdo a las actividades realizadas en cada periodo, resultados que se presenta en la Figura 12.

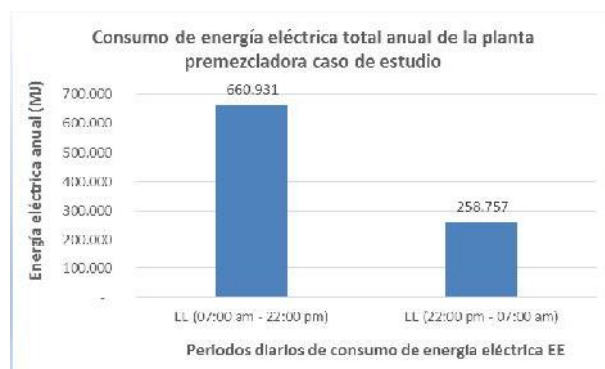


Fig. 12 Consumo de energía eléctrica total anual de la planta premezcladora caso de estudio.

La EE total consumida en el periodo de 07:00 am a 22:00 pm es de 660.931 MJ y el consumo de EE del bloque administrativo en el mismo horario es de 43.353 MJ, cuya diferencia proporciona el consumo neto de energía en la producción del hormigón, que para la temporalidad estudiada alcanzó los 617.577 MJ, equivalente al 67,15% del total anual del consumo eléctrico de la planta, datos presentados en la Figura 13.

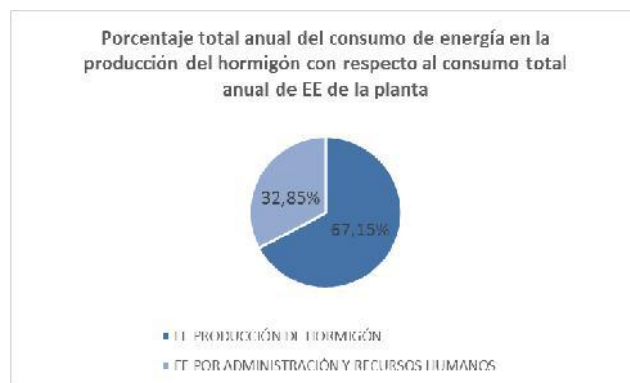


Fig. 13 Porcentaje anual de consumo de energía por concepto de producción del hormigón con respecto al consumo total anual de EE de la planta.

La EE consumida en la planta premezcladora del caso de estudio proviene del SNI (Sistema Nacional Interconectado) del Ecuador, que según dato del informe anual del CENACE (Operador Nacional de Electricidad), al 2015, el país alcanzó una producción neta total de energía de 22.591 GWh, de los cuales el 54,95% de la producción corresponde a generación hidroeléctrica y el 38,61% a generación termoeléctrica por medio de combustible fósiles, datos presentados en la Figura 14 (41).

La distribución porcentual de las distintas tecnologías para producir electricidad por medio de generadores térmicos a base de combustibles fósiles; el 33,5% se realiza a través del empleo de tecnologías más contaminantes como el diésel y el fuel oil debido a las emisiones de CO₂ que producen por cada galón de éstos combustibles que se emplean (42).



Fig. 14 Composición de la producción total de energía neta (%) – CENACE 2015 (41).

En base a este mix de generación eléctrica proveniente del SIN del país, la Comisión Técnica de Determinación de Factores de Emisión de Gases Efecto Invernadero del Ecuador, con mandato otorgado desde el 2010, mantiene actualizado el cálculo del factor de emisión de CO₂ por concepto de consumo eléctrico del país (43).

En este contexto, se determinó mediante la construcción del inventario descrito en el cálculo de entradas, que para la temporalidad estudiada, el consumo de energía eléctrica derivada del proceso de producción del hormigón premezclado en la planta caso de estudio fue de 617.577,75 MJ, equivalente al 67,15% del total anual del consumo eléctrico de la planta, dato que posteriormente y en base al factor de emisión presentado por el CENACE, será convertido a emisiones de CO₂ producto del empleo de energía eléctrica en el proceso de fabricación del hormigón premezclado.

3.2.- Salidas

3.2.1.- Producto final

El volumen de producción anual del hormigón premezclado de la planta caso de estudio se cuantificó en 107.387 m³. En la Figura 15, se presenta la producción mensual del material durante la temporalidad estudiada (año 2015).



Fig. 15 Gráfico de la producción mensual del hormigón premezclado.

En la Figura 16 se ve que la producción mensual de hormigón fluctúa entre rangos de 5,06% y 12,22% del volumen total anual de material producido, correspondiendo dichos porcentajes a los meses de diciembre y septiembre respectivamente (ver Figura 15). La producción promedio mensual de hormigón en la planta premezcladora caso de estudio es de 8.948 m³.

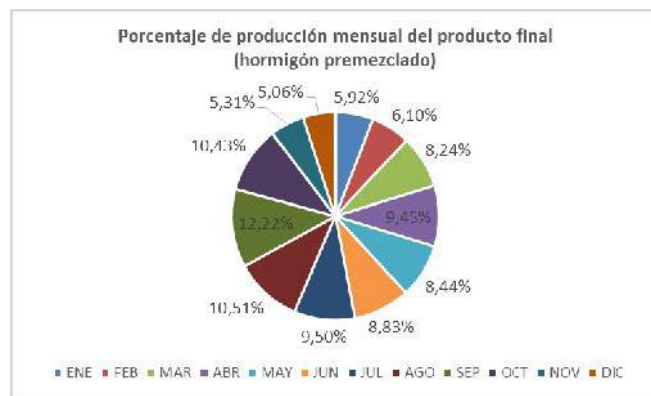


Fig. 16 Gráfico porcentaje de producción mensual de producto final.

3.3.- Cálculo de la energía contenida y las emisiones de CO₂ asociadas al proceso de fabricación del hormigón premezclado

3.3.1.- Energía Contenida

Para la determinación de la energía total anual consumida por la planta premezcladora del caso de estudio en el proceso de fabricación del hormigón, se cuantificó el consumo energético anual resultante de la sumatoria de los consumos unitarios de las etapas determinadas en el alcance de la investigación (ver Anexos 4, 5, 6), tal como se muestra en la Figura 17.

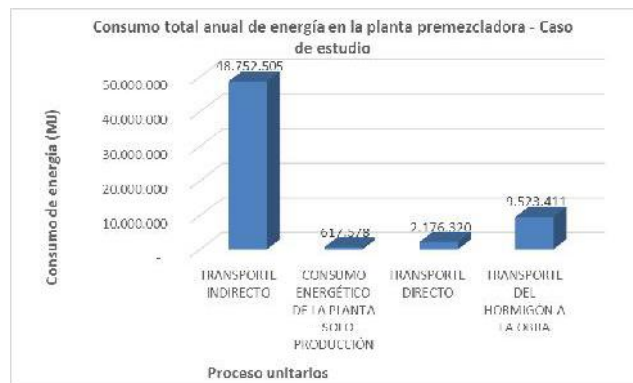


Fig. 17 Gráfico de consumo de energía por procesos unitarios en el proceso de fabricación del hormigón premezclado.

Lo que genera una sumatoria anual de energía contenida por concepto de producción del hormigón premezclado en la planta caso de estudio de 61'069.813 MJ durante el año 2015.

Analizando estos resultados, en la Figura 18 se aprecia que la etapa de la cual se deriva el mayor consumo de energía asociado al proceso de fabricación del hormigón premezclado se debe al *transporte indirecto*, que para el año de estudio alcanza un porcentaje total anual equivalente al 80% del consumo total de energía de la planta estudiada. La etapa que reporta un menor consumo global anual equivalente al 4%, es el consumo de energía dentro de los límites de la planta “de la puerta a la puerta”; es decir, las mayores aportaciones de energía contenida se presentan en los procesos ejecutados **fuera de los límites de la planta**, específicamente en lo referente a los proveedores de materia prima y su transporte.

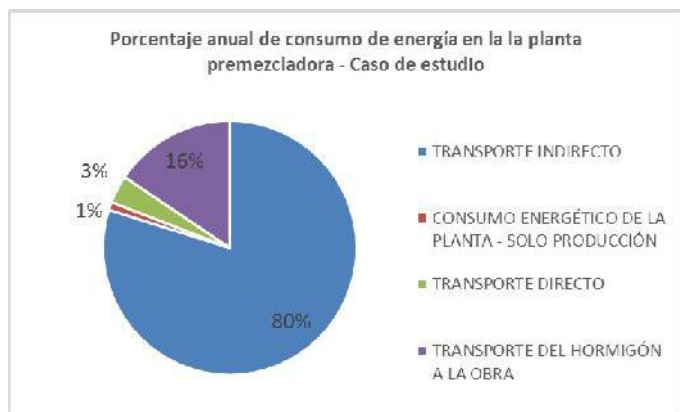


Fig. 18 Gráfico de porcentaje anual de consumo de energía en los procesos unitarios de la producción de hormigón premezclado.

A partir de la cuantificación de energía contenida total presentada en la Tabla 2, que alcanza un consumo anual de 61'069.813 MJ; y, considerando la producción anual de hormigón de la planta premezcladora en un volumen de 107.387 m³. Se determina que mediante la aplicación de un ACV simplificado “de la puerta a la puerta” (estudio de ICV), tomando en consideración la etapa previa de transporte de materia prima y la etapa posterior de entrega del producto final en obra, el valor anual de energía contenida por metro cúbico de hormigón producido alcanzaría a **568,69 MJ** (Ver Anexo 6).

Tabla 2 Resumen de energías contenidas en Mega Joule por actividad anual y cuantificación general.

ACTIVIDADES	μ MENSUAL (MJ)	TOTAL ANUAL (MJ)
Energía aportada por transporte indirecto	4.062.709	48.752.505
Energía aportada por energía eléctrica	51.465	617.578
Energía aportada por transporte directo	181.360	2.176.320
Energía aportada por transporte del producto final	793.618	9.523.411
Total de energía consumida en Mega Joule	5.089.151	61.069.813

3.3.2.- Emisiones de CO₂

• Transporte

Conforme el procedimiento señalado en el punto 2.2.2.2.2 *Cálculo de salidas literal b*, se determinó los valores expresados en la Tabla 3, en la cual se señala que por concepto de transporte

“Análisis del Inventario del Ciclo de Vida en la determinación de la energía contenida y las emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación del hormigón premezclado; caso de estudio: planta premezcladora de la ciudad de Cuenca”

dentro del proceso de fabricación del hormigón premezclado se emitieron al ambiente un total anual de 4.484 tCO₂, siendo el transporte indirecto la actividad que generó una mayor huella de carbono con un total equivalente al 81%, mientras que el transporte directo tiene el menor porcentaje colaborante de emisiones de CO₂ equivalente al 3% (ver en las Figuras 19 y 20).

Tabla 3 Cuantificación de emisiones de CO₂ anual por concepto de transporte.

TIPO DE TRANSPORTE	ANUAL (tCO ₂ emitidos)
CO ₂ aportado por transporte indirecto	3.616
CO ₂ aportado por transporte directo	161
CO ₂ aportado por transporte del producto final	706
Total de CO ₂ anual aportado por transporte	4.484

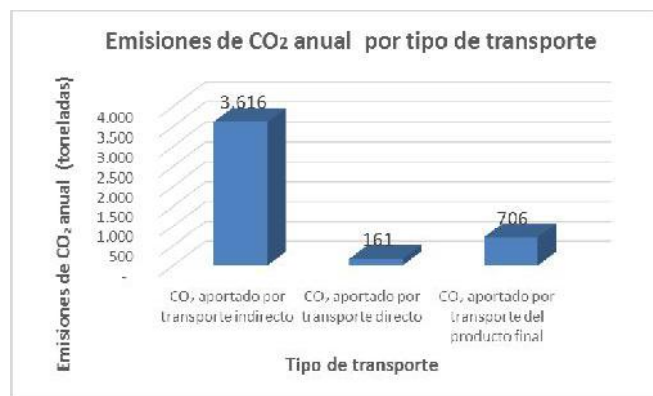


Fig. 19 Gráfico de aportaciones anuales de CO₂ por tipo de transporte.

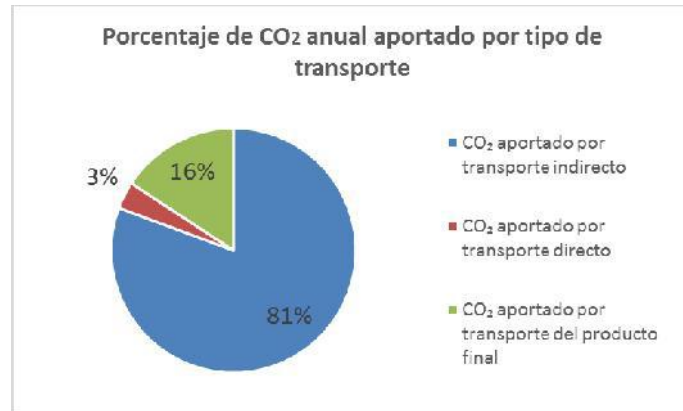


Fig. 20 Gráfico de porcentaje anual de emisiones de CO₂ por transporte.

• Energía eléctrica

A partir del consumo de energía eléctrica anual empleada para la producción del hormigón en la planta premezcladora, que para la temporalidad estudiada fue de 171,55 MWh, multiplicado por el factor de emisión de CO₂ del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador, que para el año 2015 es de 0.6760 tCO₂/MWh eq. Se determina que, por concepto de consumo eléctrico empleado en el proceso de fabricación del hormigón premezclado, anualmente se emiten al ambiente 115,97 tCO₂ eq.

Finalmente, a partir de la sumatoria de emisiones anuales de CO₂ aportadas tanto por consumo de combustible por concepto de transporte terrestre; así como por consumo de energía eléctrica,

se determinó un total de emisiones para el año de estudio de 4.599 tCO₂ por efecto de la producción del volumen total de hormigón de la planta premezcladora (Ver Tabla 4).

Tabla 4 Resumen de emisiones de CO₂ por actividad anual.

ACTIVIDADES	μ MENSUAL (kg CO ₂ emitidos)	ANUAL (kg CO ₂ emitidos)
CO ₂ aportado por transporte indirecto	301.318	3.615.811
CO ₂ aportado por energía eléctrica	9.664	115.967
CO ₂ aportado por transporte directo	13.451	161.410
CO ₂ aportado por transporte del producto final	58.860	706.320
Total de CO ₂ aportado en el proceso de fabricación	383.292	4.599.508

Analizando los resultados presentados en las Figuras 21 y 22, se aprecia claramente que la actividad que genera un mayor aporte de emisiones de CO₂ anual al ambiente, es el transporte indirecto, el cual alcanza un total anual de 3'615.811 kg CO₂, correspondiente a un porcentaje de 79% del global de emisiones, a contraposición de las emisiones por concepto de energía eléctrica que alcanza un porcentaje colaborante anual únicamente del 3%.

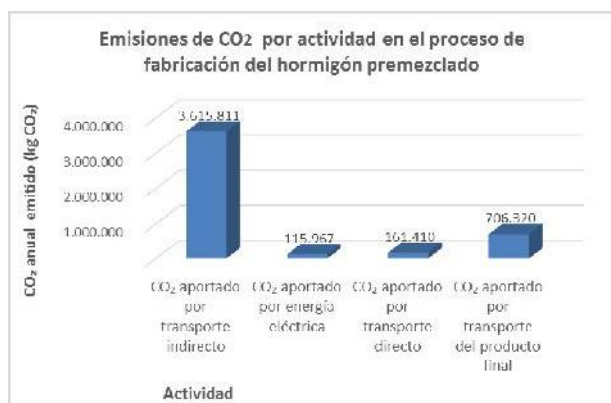


Fig. 21 Gráfico de aportaciones anuales de CO₂ por actividad en el proceso de fabricación del hormigón premezclado.

Haciendo referencia a las etapas consideradas para el estudio del ACV simplificado (estudio de ICV), con un alcance “de la puerta a la puerta” tomando en consideración la etapa previa de transporte de materia prima y la etapa posterior de entrega del producto final en obra, en la Figura 22, se aprecia que la etapa de menor incidencia en cuanto a emisiones de CO₂ dentro del proceso de fabricación del hormigón premezclado, es el generado dentro de los límites de la planta, el cual, alcanza un total de emisiones de CO₂ equivalente al 6% del porcentaje global, situación que es análoga con los datos obtenidos en cuanto a energía contenida.

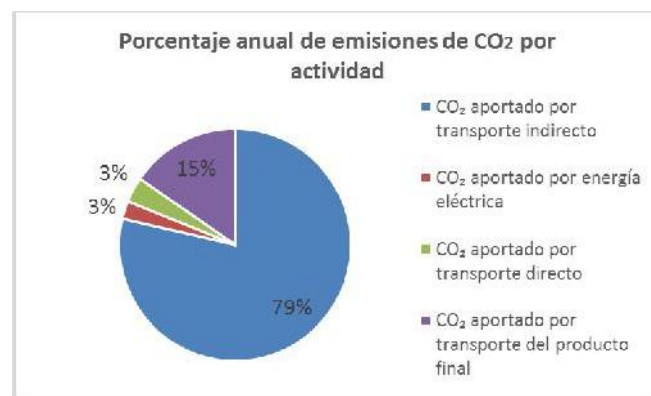


Fig. 22 Gráfico de porcentaje anual global de emisiones de CO₂ por actividad.

A partir del resultado global del aporte de emisiones de CO₂ al ambiente por concepto de producción de hormigón que para el año de estudio alcanza los 4'599.508 kg CO₂. Y considerando una producción anual de hormigón en un volumen de 107.387 m³ en la planta caso de estudio en el año 2015, se determina que la huella de carbono es de **42,83 kg CO₂ por metro cúbico de hormigón producido** (ver Anexo 9).

4. DISCUSIÓN

4.1.- Análisis comparativo con estudios similares y con bases de datos internacionales

A partir de los resultados obtenidos sobre energía contenida y emisiones de CO₂ asociados al proceso de fabricación del hormigón premezclado en la planta de la ciudad de Cuenca, se realiza un análisis comparativo con tres estudios similares. El primero a nivel de América Latina (20) realizado en Chile, y dos con bases de datos internacionales: la primera corresponde a ECOINVENT³, reconocida por su amplia variedad de datos de inventario de ciclo de vida de materiales y procesos productivos (Muñoz Sanguinetti & Quiroz Ortíz, 2015) (44), y la segunda el ICE (Inventory of carbon and energy)⁴, versión 2.0 (enero 2011), la cual cuenta con estudios de distintos hormigones premezclados. Los tres estudios comparativos se realizan con la finalidad de determinar la disparidad de los estudios citados con los obtenidos en la presente investigación (Caso estudio Ecuador).

Conforme lo recomienda la investigación en Chile (20), para lograr una correcta comparación de resultados del proceso de fabricación del hormigón premezclado, se acortaron procesos unitarios con la finalidad de disminuir la asimetría entre los casos de estudio; así, para cada caso comparativo se delinearon parámetros particulares:

³ La *Ecoinvent Association* es una asociación fundada con el objetivo de desarrollar una base de datos coherente, transparente y confiable para la comunidad Análisis de Ciclo de Vida (LCA), así como para los creadores de herramientas de diseño ecológico, industria e investigación científica (<http://www.ecoinvent.org/>).

⁴ El Inventario de Carbono y Energía o *ICE*, es una base de datos de Ciclo de Vida que presenta los valores de energía y carbono incorporado de varios materiales de construcción. Incluye más de 300 materiales como: metales (aluminio, hierro, acero), plásticos, aislamiento, agregados, cemento, hormigón, vidrio, piedra y materiales orgánicos. La base fue desarrollada y publicada por la Universidad de Bath, Reino Unido (45).



Caso 1: Comparación con los resultados de la investigación (20), estudio realizado en Chile.

Dado que en la investigación del caso de estudio Ecuador, para la cuantificación tanto de la energía contenida como de las emisiones de CO₂ asociadas al proceso de fabricación del hormigón premezclado, se consideraron los procesos unitarios de un ACV simplificado “de la puerta a la puerta”, tomando en consideración la etapa previa de transporte de materia prima y la etapa posterior de entrega del producto final en obra. Para la comparación de estos resultados con el estudio de referencia, se restaron los valores obtenidos por concepto del transporte del producto final (despachos del hormigón fuera de los límites de la planta), para generar una analogía entre parámetros de cuantificación de los casos de estudio comparados; resultados que se presentan en las tablas 5 y 6:

Tabla 5 Resumen de energías consumidas (MJ) por actividad anual – Caso 1 (Ecuador).

ACTIVIDADES	ENERGÍA ANUAL (MJ)
Energía aportada por transporte indirecto	48.752.505
Energía aportada por transporte directo	2.176.320
Energía aportada por energía eléctrica	617.578
Total de energía consumida en Mega Joule	51.546.402
Consumo de energía por metro cúbico de hormigón producido:	480,01 MJ/m³

Tabla 6 Resumen de emisiones de CO₂ por actividad anual – Caso 1 (Ecuador).

ACTIVIDADES	Kg CO ₂ ANUAL emitidos
CO ₂ aportado por transporte indirecto	3.615.811
CO ₂ aportado por transporte directo	161.410
CO ₂ aportado por energía eléctrica	115.967
Total de CO ₂ aportado en el proceso de fabricación	3.893.189
CO ₂ emitido por metro cúbico de hormigón producido:	36,25 kg CO₂ /m³

Tabla 7 Comparación de resultados Caso 1.

	MJ/m ³	kg CO ₂ /m ³
Caso estudio Chile	342,2	25,90
Caso estudio Ecuador	480,01	36,25

Caso 2: Comparación con los datos de la base ECOINVENT (SimaPro 7.3).

Para el efecto no se considera el transporte indirecto y los despachos del hormigón fuera de los límites de la planta, resultados que se presentan en las tablas 8, 9 y 10:

Tabla 8 Resumen de energías consumidas (MJ) por actividad anual – Caso 2 (Ecuador).

ACTIVIDADES	ENERGÍA ANUAL (MJ)
Energía aportada por transporte directo	2.176.320
Energía aportada por energía eléctrica	617.578
Total de energía consumida en Mega Joule	2.793.897
Consumo de energía por metro cúbico de hormigón producido:	26,02 MJ/m³

Tabla 9 Resumen de emisiones de CO₂ por actividad anual – Caso 2 (Ecuador)

ACTIVIDADES	kg CO ₂ ANUAL emitidos
CO ₂ aportado por transporte directo	161.410
CO ₂ aportado por energía eléctrica	115.967
Total de CO ₂ aportado en el proceso de fabricación	277.378
CO ₂ emitido por metro cúbico de hormigón producido:	2,58 kg CO₂ /m³

Tabla 10 Comparación de resultados Caso 2.

	MJ/m ³	kg CO ₂ /m ³
Estudios SimaPro 7.3 Base de datos Ecoinvent	55,95	256,78
Caso estudio Ecuador	26,02	2,58

Caso 3: Comparación con los datos del ICE (Inventory of carbon and energy) versión 2.0 (enero 2011).

Al igual que en el caso 1, para la comparación de resultados, no se considera el transporte por despachos del hormigón fuera de los límites de la planta, a partir de lo cual, se determinan los valores expresados en la Tabla 11.

Tabla 11 Comparación de resultados Caso 3.

	MJ/m ³	kg CO ₂ /m ³
ICE	547,2	74,90
Caso estudio Ecuador	480,01	36,25

Analizando los resultados presentados en las tablas anteriores, en lo referente a la energía contenida; en el caso comparativo 1, el resultado de esta investigación (caso Ecuador) presenta un incremento del 40.27% con respecto al valor obtenido de la investigación realizada en Chile, a razón de que existe un incremento de 137,81 MJ/m³ de hormigón premezclado producido.

En el caso 2, la diferencia entre energías contenidas de los casos comparados alcanza un valor de 29.93 MJ/m³, equivalente al 53,50% menor el resultado del caso estudio Ecuador con respecto al dato de la base ECOINVENT, lo que según el estudio (20), podría deberse a la diferencia en los tipos de combustibles usados, así como a las tecnologías y equipos empleados en la fabricación del hormigón.



Pertinente al caso 3, la energía contenida del caso de estudio Ecuador, alcanza el 87,72% del valor de la base ICE, correspondiente a una cantidad de energía contenida menor de 67.19 MJ/m³ de hormigón producido.

En lo referente a las emisiones de CO₂, los resultados son análogos a los obtenidos en cuanto a energía contenida. Así, en el caso 2 y 3, los valores correspondientes al caso de estudio del Ecuador, son menores a los tomados como referencia de las bases internacionales ECOINVENT e ICE, en un porcentaje equivalente al 98.99% (254,20 kg CO₂/m³) y 51,60% (38,65 kg CO₂/m³) respectivamente; a diferencia de lo determinado con el caso 1 (estudio Chile), en el cual el dato de emisiones de CO₂ anual del Ecuador es un 39.98% mayor al caso de referencia correspondiente a un adicional de 10,35 kgCO₂/m³ de hormigón producido.

Esta alta disparidad en cuanto a los resultados obtenidos de la comparación entre los casos de estudio, referente a las emisiones de CO₂, puede deberse a la diversidad de combustible utilizados en cada proceso y a que las matrices energéticas de cada país son diferentes, lo que genera en consecuencia, que también lo sean las emisiones asociadas a su producción de energía.

5. CONCLUSIONES

Mediante la aplicación de la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) según la norma ISO 14040:2006, es posible determinar la energía contenida y las emisiones de CO₂ asociadas al proceso de fabricación del hormigón premezclado. En el caso puntual de esta investigación se determinó que para producir un metro cúbico de hormigón premezclado en la planta de nuestro caso de estudio, se requieren 568,69 MJ de energía, con una emisión de 42,83 kg CO₂.

En lo referente a la energía contenida y emisiones de CO₂ en los procesos unitarios de la fabricación del hormigón premezclado, el estudio determina que el transporte indirecto es el responsable del 80% del consumo global anual de energía y del 79% de las aportaciones anuales de emisiones de CO₂ al ambiente, siendo la actividad de mayor incidencia en el proceso productivo analizado.

En general se puede concluir que las actividades ejecutadas *fuera de los límites de la planta*, son los responsables del mayor dispendio energético y de la emisión de CO₂ en el proceso de producción estudiado. Por lo cual, es indispensable considerar alternativas de reducción de dichos impactos, mediante la implementación de acciones enfocadas a reducir el número de despachos por parte de los proveedores de materia prima; así como, buscar alternativas sobre la inmediatez de los lugares de origen de las mismas.

Con respecto al estudio comparativo, la investigación determinó que los datos obtenidos en el caso Ecuador referentes a energía contenida y emisiones de CO₂ asociados al proceso de fabricación del hormigón premezclado, son mayores, con respecto al caso de América Latina (estudio de Chile), en un porcentaje del 40.27% y de 39.98% respectivamente; mientras que en los casos comparativos con las bases internacionales ECOINVENT e ICE, los valores del caso Ecuador son menores en porcentajes de 53,50% y 12,28 % en cuanto a energía

contenida; y del 98.99% y 51,60% en lo referente a emisiones de CO₂.

Finalmente, es importante recalcar la importancia de la ejecución de investigaciones similares con los materiales de construcción básicos, con el objetivo de generar una base de datos nacional (Ecuador), en la cual se incluyan los principales insumos de la construcción como: el hormigón premezclado (material que fue objeto de este estudio), el cemento, el ladrillo, la madera, el bloque, etc; y sus correspondientes valores de energía incorporada; así como, de las emisiones de CO₂ generadas por concepto de su producción.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca DIUC, por el financiamiento del proyecto "Método de Certificación de la Construcción Sustentable de Viviendas" que resultó ganador del XIII Concurso Universitario de Proyectos de Investigación, del cual forma parte este estudio; al Centro de Investigación de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo; al Centro de Postgrados de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo, a la Maestría en Construcciones por su valiosa formación profesional y humana brindada; y a la Universidad de Cuenca por acogernos como cuna del conocimiento, forjando en nosotros el espíritu de lucha para alcanzar nuestros objetivos con el propósito de servir a la comunidad y trabajar por un mundo más inclusivo, solidario y amigable con el ambiente.

De la misma forma, nuestro sincero agradecimiento al personal de la planta premezcladora – caso de estudio Cuenca; de manera singular a su Apoderado Especial, por permitir el desarrollo de esta investigación y a los Técnicos de las diferentes áreas que gentilmente aportaron con la información primaria de las bases de datos de la planta; misma que constituyó la materia prima para el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CAF Banco de Desarrollo de América Latina, ARPEL, ALADI, CEPAL, CIER, OLADE, et al. Energía: Una Visión sobre los retos y oportunidades en América Latina y el Caribe. 2013. p. 88.
2. Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos. Resumen Balance Energético 2015. Resumen ejecutivo. Balanc Energético Nac 2015 [Internet]. 2015;54. Available from: <http://www.sectoresestrategicos.gob.ec/balance-energetico/>
3. IPCC. Fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático. 2011.
4. Universidad Marítima del Caribe. Uso histórico de la energía y perspectivas de investigación de la energía alternativa en la Universidad Marítima del Caribe. 2016;(September).
5. Fuentes R, Mecánico I, Centro C, Tecnológico DD.



- REVISTA FUENTES, Vol. 11, núm. 2 (2013). 2016;11(2013):1–16.
6. PAS 2050. Specifications for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. BSI British Standards. Londres; 2011.
7. Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF). Informe planeta vivo 2014. Fondo Mund para la Nat. 2014;1–44.
8. Frohmann A, Herreros S, Mulder N, Olmos X, Naciones Unidas, CEPAL. Sostenibilidad ambiental y competitividad internacional La huella de carbono de las exportaciones de alimentos. 2015;96.
9. Lopez Sardi EM, de Chena BNG. Análisis de riesgos para la reserva ecológica de América Latina y el Caribe. Rev Cienc y Tecnol [Internet]. 2015;15:97–112. Available from: <http://ezproxy.concytec.gob.pe:2048/login?url=http://se.arch.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=aci&AN=111950843&lang=es&site=eds-live>
10. Mercader M, Marrero M, Solís J, Montes M V, Ramírez A. Cuantificación de los recursos materiales consumidos en la ejecución de la cimentación. Quantif Mater Resour Consum Dur Concr slab Constr [Internet]. 2010;62(517):125–32. Available from: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/814/899>
11. Freire Guerrero A, Muñoz Martín J, Marrero M. Incorporación de la Huella de Carbono y Huella Ecológica en las bases de costes de construcción. Estudio de caso de un proyecto de urbanización en Écija, España. 2016;6–17.
12. Guillén-Mena V, Quesada F, López M, Orellana D, Serrano A. Eficiencia energética en edificaciones residenciales. 2014;(5):63–73. Available from: <http://www.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/estoa/article/view/623>
13. Cárdenas JP, Muñoz E, Riquelme C, Hidalgo F. Análisis de ciclo de vida simplificado aplicado a viviendas de paneles SIP (structural insulated panels). Rev Ing Constr. 2015;30(1):33–8.
14. Suárez Salgado SS, Universidad Politécnica de Catalunya. Propuesta metodológica para evaluar el comportamiento ambiental y económico de los residuos de construcción y demolición (RCD) en la producción de materiales pétreos. Barcelona; 2015. p. 305.
15. Marrero M, Martínez-Escobar L, Mercader-Moyano P, Leiva C. Minimización del impacto ambiental en la ejecución de fachadas mediante el empleo de materiales reciclados. Inf la Construcción [Internet]. 2013;65(529):89–97. Available from: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.11.034>
16. Arena P, Adriana E, Medina V, Pablo J, Amador C, Suppen N, et al. Análisis de Ciclo de Vida y Ecodiseño para la Construcción en México. 2013;
17. Wadel G, Avellaneda J, Cuchí a. La sostenibilidad en la arquitectura industrializada: cerrando el ciclo de los materiales. Inf la Construcción. 2010;62:37–51.
18. Zabalza Bribián I, Valero Capilla A, Aranda Usón A. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. Build Environ [Internet]. Elsevier Ltd; 2011;46(5):1133–40. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>
19. Pappu A, Saxena M, Asolekar SR. Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials. Build Environ. 2007;42:2311–20.
20. Muñoz Sanguinetti C, Quiroz Ortíz F. Análisis de Ciclo de Vida en la determinación de la energía contenida y la huella de carbono en el proceso de fabricación del hormigón premezclado. Caso estudio planta productora Región del Bío Bío, Chile. Hábitat Sustentable. 2015;4(Lci):16–25.
21. Asif M, Muneer T, Kelley R. Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland. Build Environ [Internet]. 2007;42(3):1391–4. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132305004956>
22. Doménech JL. HUELLA ECOLÓGICA Y DESARROLLO SOSTENIBLE. 2007.
23. González Arias E. Nueva técnica de dosificación de hormigones reciclados: Método del volumen de mortero equivalente. Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería en Construcción.; 2012.
24. Aldana J, Serpell A. Temas y tendencias sobre residuos de construcción y demolición. Rev la Constr. 2012;11:4–16.
25. Zito S, Irassar E, Rahha V. Estudio sobre pastas y morteros de cemento portland con reemplazo por loza sanitaria. 2016;
26. Kosmatka SH, Kerkhoff B, Panarese WC, Tenesi J. Diseño y control de mezclas de concreto. Primera Ed. 2004.
27. Teresa A, Beatriz A, Rosa B, Potosí UA de SL de. Análisis de Ciclo de Vida y Ecodiseño para la construcción en México. México.; 2013. 2013;2013.
28. Moral Quiza A, Couceiro Martínez L, Sampedro Rodríguez Á. El Análisis de Ciclo de Vida como herramienta de evaluación ambiental en las secciones de firme. 2015;
29. AENOR. UNE-EN-ISO-14040:2006. 2006.
30. Carabaño R, Bedoya C, Ruiz D. Análisis de ciclo de vida de una nueva solución arquitectónica que mejora el rendimiento térmico de la envolvente del edificio: Fachada Natural Aljibe. Inf la Construcción. 2014;66(535):e034.
31. The International Standards Organisation. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Iso 14040. 2006;2006:1–28.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

32. Ihobe. Análisis de ciclo de vida y huella de carbono [Internet]. Dos maneras de medir el impacto ambiental de un 2009. Available from: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:An?lisis+de+ciclo+de+vida+y+huella+de+carbono#0>
33. Wei HL, Ni JR, Xu N. Energy, Material and Pollutant Intensity Analysis in the Life Cycle of Walling Materials. Energy Sources, Part A Recover Util Environ Eff. 2008;30(January 2015):1367–81.
34. Cuchí A. Los flujos de energía en la edificación Albert Cuchí Universidad Politécnica de Cataluña Diplomado internacional Acercamiento a criterios arquitectónicos ambientales para comunidades aisladas en áreas naturales protegidas de Chiapas Universidad Autónoma d. 2003;
35. EKOS. Ranking 1000 Empresarial 2015. 2015. p. 130.
36. EKOS UIEM. Ranking 1000 2016. Rev Ekos. 2016;230.
37. Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos INEC. Anuario de Estadísticas de Edificaciones 2014 - INEC. 2014.
38. Quesada Molina F. Método de Certificación de la Construcción Sustentable de Viviendas. Cuenca; 2015.
39. Fernando A, Ricardi Q, Artículo F. Medidas de tendencia central y dispersión. 2011;(3):1–6.
40. Tortosa Ricote C. Inventario de emisiones de referencia. 2011.
41. CENACE. CENACE Informe anual 2015.
42. Haro L, Oscullo J. Factor Anual de Emisión de CO₂ Producido por el Parque Generador del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador , Sobre el Cambio Climático UNFCCC , para el Periodo 2009-2014 Annual CO₂ Emission Factor Produced by the Generating Plants of National Inte. 2016;37(1).
43. CENACE. Informe 2016, Factor de emisión de CO₂ del Sistema Nacional Interconectado 2016. 2016. p. 15.
44. Oliveira Leão SM. Comparación de Inventarios de Ciclo de Vida de cultivos ecológicos en Catalunya y base de datos Ecoinvent y repercusión en el análisis del impacto. Caso de estudio: cultivo de trigo ecológico. Universidad de Barcelona; 2013.
45. Hammond G, Jones C. A BSRIA guide Embodied Carbon The Inventory of Carbon and Energy (ICE). 2011;136. Available from: <http://www.ihsti.com/tempimg/57c152b-ENVIRO2042201160372.pdf>



ANEXOS

Anexo 1. Consumo de combustible por transporte de agregados. Fuente: La autora.

CONSUMO DE COMBUSTIBLE POR TRANSPORTE DE AGREGADOS POR PROVEEDOR - AÑO 2015				
TIPO DE AGREGADO	PROVEEDOR	GALONES DE COMBUSTIBLE (DIESEL) ANUAL POR TRANSPORTE DE AGREGADOS		
		TONELAJE 22-29 (galones de diésel)	TONELAJE 30-38 (galones de diésel)	TOTAL (galones de diésel)
ARENA	1 (Santa Isabel)	65.401,16	11.561,69	76.962,84
	2 (Santa Isabel)	13.376,84	28.880,78	42.257,62
	3 (Descanso)	4.525,05		4.525,05
CONSUMO DE COMBUSTIBLE TOTAL ANUAL POR TRANSPORTE DE ARENA				123.745,52
GRAVA 3/4	1 (Santa Isabel)	44.733,85	3.356,62	48.090,47
	2 (Santa Isabel)	12.251,97	31.056,10	43.308,07
	3 (Descanso)			-
CONSUMO DE COMBUSTIBLE TOTAL ANUAL POR TRANSPORTE DE GRAVA DE 3/4				91.398,54
TRITURADO 3/4	1 (Santa Isabel)	8.928,64	1.225,43	10.154,07
	2 (Santa Isabel)			-
	3 (Descanso)	8.406,25		8.406,25
CONSUMO DE COMBUSTIBLE TOTAL ANUAL POR TRANSPORTE DE TRITURADO 3/4				18.560,32
TRITURADO 3/8	1 (Santa Isabel)	4.033,75	799,19	4.832,95
CONSUMO DE COMBUSTIBLE TOTAL ANUAL POR TRANSPORTE DE TRITURADO 3/8				4.832,95
TOTAL ANUAL DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE POR TRANSPORTE DE AGREGADOS AL 2015				238.537,33
				galones de diésel

Anexo 2. Tabla resumen de consumo de combustible total anual por producción del hormigón premezclado - planta caso de estudio. Fuente: La autora.

TABLA RESUMEN DEL CONSUMO TOTAL ANUAL DE COMBUSTIBLE AL 2015				
TRANSPORTE POR CONCEPTO	TIPO DE COMBUSTIBLE	CANTIDAD (galones)	Factor de conversión a m³	VOLUMEN (m³)
TRANSPORTE INDIRECTO (MATERIA PRIMA)		357.790,29		1.354,38
ARENA	diesel	123.745,52	0,0037854	468,43
GRAVA 3/4	diesel	91.398,54	0,0037854	345,98
TRITURADO 3/4	diesel	18.560,32	0,0037854	70,26
TRITURADO 3/8	diesel	4.832,95	0,0037854	18,29
CEMENTO	diesel	118.332,96	0,0037854	447,94
ADITIVO	diesel	920,00	0,0037854	3,48
TRANSPORTE DIRECTO		15.971,82		60,46
CARGADORES FRONTALES	diesel	5.290,28	0,0037854	20,03
MEZCLADO EN EL MIXER	diesel	10.681,54	0,0037854	40,43
TRANSPORTE DEL HORMIGÓN A LA OBRA		69.891,46		264,57
TRANSPORTE DEL PRODUCTO FINAL	diesel	69.891,46	0,0037854	264,57
CONSUMO TOTAL ANUAL DE DIESEL AL 2015		443.653,57		1.679,41
		galones de diesel		m³ de diesel



Anexo 3. Consumo total anual de combustible empleado en el funcionamiento de los mixers. Fuente: La autora.

TABLA RESUMEN DEL CONSUMO TOTAL ANUAL DE COMBUSTIBLE EMPLEADO EN LOS MIXER

N° TOTAL anual de galones de combustible (diésel) consumido por los MIXER	N° de galones total anual de combustible consumido en el proceso de mezclado del H°	N° Galones total de Combustible en el despacho y transporte de H° a las obras
80.573,00	10.681,54	69.891,46

Anexo 4. Tabla resumen de consumo anual de energía por concepto de combustible en transporte al 2015. Fuente: La autora

TABLA DE CONSUMO ANUAL DE ENERGÍA POR CONCEPTO DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN TRANSPORTE AL 2015							
TRANSPORTE POR CONCEPTO	TIPO DE COMBUSTIBLE	CANTIDAD (galones)	CANTIDAD (litros)	FACTOR DE CONVERSIÓN A kWh/litros	ENERGÍA (kWh)	FACTOR DE CONVERSIÓN kWh a MJ	ENERGÍA (MJ)
TRANSPORTE INDIRECTO (MATERIA PRIMA)		357.790,29	1.354.236,24		13.542.362,39		48.752.504,61
ARENA	diesel	123.745,52	468.376,80	10	4.683.768,01	3,60	16.861.564,85
GRAVA 3/4	diesel	91.398,54	345.943,46	10	3.459.434,58	3,60	12.453.964,47
TRITURADO 3/4	diesel	18.560,32	70.250,82	10	702.508,16	3,60	2.529.029,39
TRITURADO 3/8	diesel	4.832,95	18.292,70	10	182.927,01	3,60	658.537,25
CEMENTO	diesel	118.332,96	447.890,26	10	4.478.902,63	3,60	16.124.049,45
ADITIVO	diesel	920,00	3.482,20	10	34.822,00	3,60	125.359,20
TRANSPORTE DIRECTO		15.971,82	60.453,32		604.533,20		2.176.319,53
CARGADORES FRONTALES	diesel	5.290,28	20.023,70	10	200.237,02	3,60	720.853,28
MEZCLADO EN EL MIXER	diesel	10.681,54	40.429,62	10	404.296,18	3,60	1.455.466,25
TRANSPORTE DEL HORMIGÓN A LA OBRA		69.891,46	264.539,19		2.645.391,87		9.523.410,73
TRANSPORTE DEL PRODUCTO FINAL	diesel	69.891,46	264.539,19	10	2.645.391,87	3,60	9.523.410,73
CONSUMO TOTAL ANUAL DE ENERGÍA POR CONCEPTO DE TRANSPORTE AL 2015			1.679.228,75		16.792.287,46		60.452.234,87
			litros de diesel		kWh		MJ

Anexo 5. Tabla resumen de consumo anual de energía en la producción del hormigón en la planta caso de estudio al 2015. Fuente: La autora.

CONSUMO DE ENERGÍA ANUAL EMPLEADA EN LA PRODUCCIÓN DEL HORMIGÓN - AÑO 2015		
	EE (kWh)	EE (MJ)
CONSUMO TOTAL ANUAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA PLANTA HORARIO DE PRODUCCIÓN 07:00 - 22:00	183.592,00	660.931,20
CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL BLOQUE ADMINISTRATIVO HORARIO 07:00 - 22:00	12.042,62	43.353,45
CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA SOLO PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN 07:00 - 22:00	171.549,38	617.577,75

Anexo 6. Energía contenida por metro cúbico de hormigón producido en la planta premezcladora caso de estudio, año 2015. Fuente: La autora.

TABLA RESUMEN DE CONSUMO TOTAL DE ENERGÍA	
ENERGÍA	MJ
CONSUMO ENERGÉTICO DE LA PLANTA - SOLO PRODUCCIÓN	617.577,75
ENERGÍA POR CONSUMO DE COMBUSTIBLE	60.452.234,87
TOTAL DE CONSUMO AL 2015 (MJ)	61.069.812,63
VOLUMEN TOTAL DE HORMIGÓN PRODUCIDO AL 2015 (m³)	107.386,50
CONSUMO DE ENERGÍA POR METRO CÚBICO DE HORMIGÓN PRODUCIDO	568,69
	MJ/m³



Anexo 7. Tabla resumen de emisiones de CO₂ anual por concepto de consumo de combustible en transporte al 2015. Fuente: La autora.

TABLA DE EMISIONES DE CO ₂ ANUAL POR CONCEPTO DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN TRANSPORTE AL 2015								
TRANSPORTE POR CONCEPTO	TIPO DE COMBUSTIBLE	CANTIDAD (galones)	CANTIDAD (litros)	FACTOR DE CONVERSIÓN A ENERGÍA (kWh/litros)	ENERGÍA (kWh)	FACTOR DE EMISIÓN DE CO ₂ (gCO ₂ /kWh)	g CO ₂	t CO ₂
TRANSPORTE INDIRECTO (MATERIA PRIMA)		357.790,29	1.354.236,24		13.542.362,39		3.615.810.758,70	3.615,81
ARENA	diesel	123.745,52	468.376,80	10	4.683.768,01	267,00	1.250.566.059,49	1.250,57
GRAVA 3/4	diesel	91.398,54	345.943,46	10	3.459.434,58	267,00	923.669.031,75	923,67
TRITURADO 3/4	diesel	18.560,32	70.250,82	10	702.508,16	267,00	187.569.679,93	187,57
TRITURADO 3/8	diesel	4.832,95	18.292,70	10	182.927,01	267,00	48.841.512,38	48,84
CEMENTO	diesel	118.332,96	447.890,26	10	4.478.902,63	267,00	1.195.867.001,14	1.195,87
ADITIVO	diesel	920,00	3.482,20	10	34.822,00	267,00	9.297.474,00	9,30
TRANSPORTE DIRECTO		15.971,82	60.453,32		604.533,20		161.410.364,94	161,41
CARGADORES FRONTALES	diesel	5.290,28	20.023,70	10	200.237,02	267,00	53.463.284,95	53,46
MEZCLADO EN EL MIXER	diesel	10.681,54	40.429,62	10	404.296,18	267,00	107.947.079,99	107,95
TRANSPORTE DEL HORMIGÓN A LA OBRA		69.891,46	264.539,19		2.645.391,87		706.319.629,36	706,32
TRANSPORTE DEL PRODUCTO FINAL	diesel	69.891,46	264.539,19	10	2.645.391,87	267,00	706.319.629,36	706,32
EMISIONES DE CO ₂ TOTAL ANUAL POR CONCEPTO DE TRANSPORTE AL 2015			1.679.228,75		16.792.287,46		4.483.540.753,00	4.483,54
			litros de diésel		kWh		g CO ₂	t CO ₂

Anexo 8. Emisiones de CO₂ anual por concepto de consumo de energía eléctrica (EE) en el proceso de fabricación del hormigón premezclado en la planta caso de estudio al 2015. Fuente: La autora.

TABLA DE EMISIONES DE CO ₂ ANUAL POR CONCEPTO DE CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA AL 2015				
CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA	EE (kWh)	EE (MWh)	FACTOR DE EMISIÓN DE CO ₂ (tCO ₂ /MWh)eq	t CO ₂ eq
CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA SOLO PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN 07:00 - 22:00	171.549,38	171,55	0,676	115,97

Anexo 9. Emisiones de CO₂ por metro cúbico de hormigón producido en la planta premezcladora caso de estudio, año 2015. Fuente: La autora.

TOTAL DE EMISIONES DE CO ₂ AL AÑO 2015		
EMISIONES DE CO ₂	t CO ₂	kg CO ₂
POR CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN TRANSPORTE	4.483,54	4.483.540,75
POR CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA	115,97	115.967,38
	4.599,51	4.599.508,13
VOLUMEN TOTAL DE HORMIGÓN PRODUCIDO AL 2015 (m ³)	107.386,50	
EMISIONES DE CO ₂ POR METRO CÚBICO DE HORMIGÓN PRODUCIDO	42,83	kg CO ₂ /m ³



Anexo 11. Formato de matriz resumen de ingreso de materia prima de cada uno de los proveedores de materias primas de la planta premezcladora caso de estudio. Fuente: Planta premezcladora caso de estudio.

INGRESO DE MATERIAS PRIMAS						
MES	CEMENTO A GRANEL (Toneladas al año)	AGREGADOS				ADITIVOS (Kilogramos al año)
		Arena (Toneladas al año)	Grava de 3/4 (Toneladas al año)	Triturado de 3/4 (Toneladas al año)	Triturado de 3/8 (Toneladas al año)	
ENE						
FEB						
MAR						
ABR						
MAY						
JUN						
JUL						
AGO						
SEP						
OCT						
NOV						
DIC						
TOTAL ANUAL						

Anexo 12. Formato de matriz resumen de consumo de combustible por funcionamiento de la cargadora frontal en la dosificación de las materias primas. Fuente: Planta premezcladora caso de estudio.

CONSUMO DE COMBUSTIBLE - Cargadora frontal		
Mes	N° de cargadoras	N° Galones de Combustible consumido (diésel)
ENE		
FEB		
MAR		
ABR		
MAY		
JUN		
JUL		
AGO		
SEP		
OCT		
NOV		
DIC		
TOTAL ANUAL:		



Anexo 13. Formato de matriz resumen de consumo de energía eléctrica (EE) de la planta premezcladora caso de estudio.
Fuente: Planta premezcladora caso de estudio.

CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA (EE)			
MES	EE en la producción del Hormigón (MJ) 07:00 - 22:00	EE de la planta (MJ) 22:00 - 07:00	EE Total Anual (MJ)
ENE			
FEB			
MAR			
ABR			
MAY			
JUN			
JUL			
AGO			
SEP			
OCT			
NOV			
DIC			
TOTAL ANUAL:			

Anexo 14. Formato de tabla resumen de producción anual del producto final en la planta premezcladora caso de estudio para la temporalidad estudiada. Fuente: Planta premezcladora caso de estudio.

VOLÚMENES DE HORMIGÓN PREMEZCLADO - PRODUCTO FINAL	
Mes	m³ Totales vendidos
ENE	
FEB	
MAR	
ABR	
MAY	
JUN	
JUL	
AGO	
SEP	
OCT	
NOV	
DIC	
VOLUMEN TOTAL	